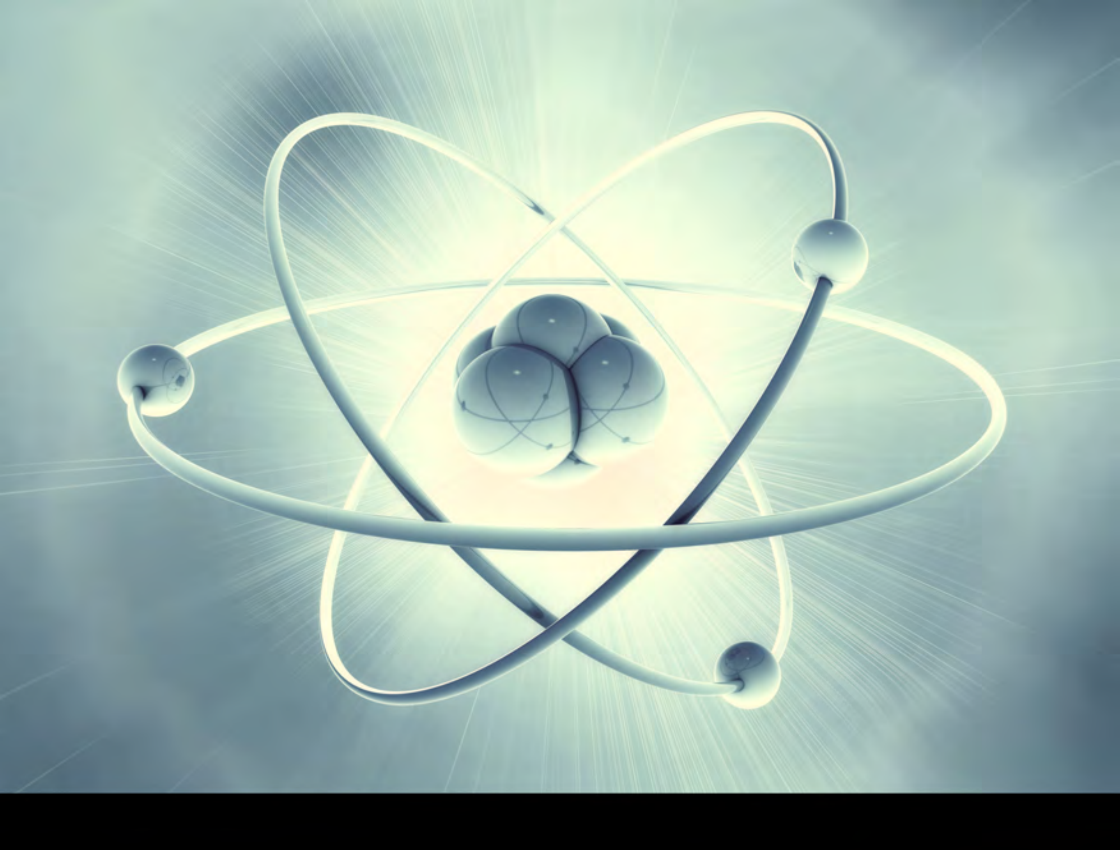


مقدمة قصيرة جدًّا

فيزياء الجسيمات

فرانك كلوس

فيزياء الجسيمات

فيزياء الجسيمات

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
فرانك كلوس

ترجمة
محمد فتحي خضر



فيزياء الجسيمات

فرانك كلوس

Particle Physics

Frank Close

الطبعة الأولى ٢٠١٤م
رقم إيداع ٤٥٠٩ / ٢٠١٤
جميع الحقوق محفوظة للناشر مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
المشهرة برقم ٨٨٦٢ بتاريخ ٢٦ / ٨ / ٢٠١٢

مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٠٢ ٢٢٧٠٦٣٥٢ + **فاكس:** ٢٠٢ ٣٥٣٦٥٨٥٣ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: http://www.hindawi.org

كلوس، فرانك.
فيزياء الجسيمات: مقدمة قصيرة جدًّا/تأليف فرانك كلوس.
تدمك: ٩٧٨ ٩٧٧ ٧١٩ ٦٩٣ ٢

١- البروتونات
٢- الإلكترونات
٣- الذرات

أ- العنوان

٥٣٩,٧٢١٢

تصميم الغلاف: إيهاب سالم.

المحتويات

تصدير

تتكون أجسادنا من ذرات؛ ومع كل شهيق، يدخل جسدَك ملايينُ مليارات المليارات من ذرات الأكسجين، وهو ما يمنحك فكرةً عن مدى ضآلة كل ذرة من هذه الذرات. وكلُّ هذه الذرات، إضافةً إلى ذرات الكربون الموجودة في جسدك — بل في الواقع جميع الذرات الأخرى الموجودة على سطح الأرض — تكوَّنَتْ داخل النجوم منذ نحو خمسة مليارات عام. أنت إذن تتألَّف من مادة تتساوى في عمرها مع عمر كوكبنا، ويبلغ عمرها ثلثَ عمر الكون، مع أن هذه هي المرة الأولى التي تتجمع فيها تلك الذرات على هذا النحو بحيث تتفكَّر في نفسها بوصفها إنسانًا.

فيزياء الجسيمات هي المجال الذي بيَّنَ لنا كيف تُبنَى المادة، وهي المجال الذي يشرع في تفسير من أين جاءت المادة بكل صورها. في المعجلات العملاقة — الممتدة طولًا عادةً لأميال عدة — يمكننا تعجيل أجزاء من الذرات؛ جسيمات على غرار الإلكترونات والبروتونات، بل يمكننا أيضًا تعجيل أجزاء من المادة المضادة، ثم دفعها للاصطدام بعضها ببعض. وحين نفعل هذا فإننا ننتج — للحظة وجيزة وفي مساحة مكانية صغيرة — تركيزًا شديدًا للطاقة، يماثل ما كان عليه الكون بعد انقضاء جزء يسير من الثانية على الانفجار العظيم. وبهذا نكتسب المعرفةَ بشأن أصولنا.

كان اكتشاف طبيعة الذرة منذ مائة عام أمرًا يسيرًا نسبيًّا: فالذرات موجودة في كل صور المادة حولنا، وكان بالإمكان اختبار أسرارها باستخدام معدَّاتٍ تُوضَع على طاولات المختبرات. بَيْدَ أن الكشف عن الكيفية التي ظهرت بها الذرات إلى الوجود يمثِّل تحديًا مختلفًا بالكامل؛ فلا يوجد جهازُ «انفجار عظيم» معروض للبيع في الكتالوجات العلمية. بل إن القِطَع الأساسية التي تُنتج حزمَ الجسيمات، وتعجِّلها وصولًا إلى سرعات تدنو كثيرًا من سرعة الضوء، ثم تجعلها تصطدم بعضها ببعض، ثم تسجِّل النتائج من أجل

تحليلها؛ كلُّ هذه القِطَع يجب أن يتم تصنيعُها على أيدي فِرَقٍ من الخبراء. وإنَّ قدرتنا على عمل ذلك ما هي إلا تتويج لقرن من الاكتشاف والتقدُّم التكنولوجي. إنه لمسعًى هائلٌ مكلِّفٌ، لكنه السبيل الوحيد الذي نعرفه للإجابة عن مثل هذه الأسئلة العميقة. وخلال هذه الرحلة، جرى تصنيع أدوات واختراعات لم تكن متوقَّعةً. وفي الوقت الحالي تُستخدَم المادة المضادة وكواشف الجسيمات المعقَّدَة في الفحص الطبي، كما أدَّتْ أنظمة جمع البيانات التي صُمِّمَتْ في سيرن (المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية) إلى اختراع الشبكة العنكبوتية العالمية، وما هذه إلا منتجات فرعية لفيزياء الجسيمات العالية الطاقة.

إن تطبيقات تكنولوجيا فيزياء الطاقة العالية واكتشافاتها غفيرة، بَيْدَ أن هذا الهدف التكنولوجي ليس هو الهدف الذي يجري من أجله البحث في هذا المجال، بل الباعث هو الفضول، والرغبة في معرفة المادة التي نتكوَّن منها، ومن أين أتَتْ، والسبب وراء ذلك التوازن الدقيق الذي تتَّسِم به قوانين الكون والذي يقف خلف تطوُّرنا.

في هذه المقدمة القصيرة جدًّا آمُل أن أمنح القارئ لمحةً عمَّا وجدناه، وعن بعض الأسئلة الكبرى التي تواجهنا في مطلع القرن الحادي والعشرين.

الفصل الأول

رحلة إلى مركز الكون

مقدمة عامة إلى الجسيمات، والمادة، والكون بصورة عامة.

* * *

المادة

آمَن الإغريق القدماء بأن كل شيء يتكوَّن من حفنة قليلة من العناصر الأساسية. كانت فكرتهم صحيحةً في جوهرها، أما التفاصيل فلم تكن كذلك؛ إذ إن العناصر الأساسية — الأرض والهواء والنار والماء — التي رأوا أن كل شيء يتألَّف منها، تتألَّف هي الأخرى بدورها مما نعرفه اليوم باسم العناصر الكيميائية. فالماء الصافي يتألف من عنصرين كيميائيين؛ هما الهيدروجين والأكسجين، والهواء يتألف في معظمه من النِّتروجين والأكسجين، مع مسحة من الكربون والأرجون. تحتوي قشرة الأرض على معظم العناصر التسعين الموجودة في عالمنا بصورة طبيعية، وأبرزها الأكسجين والسليكون والحديد، والمختلطة بالكربون والفسفور والكثير من العناصر الأخرى التي لم يسبق لك على الأرجح أن سمعتَ بها على غرار الروثينيوم والهولميوم والروديوم.

تتفاوت العناصر من حيث وفرتها تفاوتًا عظيمًا، وكقاعدة عامة، فإن أول العناصر التي تتبادر إلى ذهنك هي من أكثر العناصر شيوعًا، بينما تلك التي لم يسبق لك أن سمعتَ بها من قبلُ قطُّ، هي العناصر الأندر. ومن ثَمَّ فإن الأكسجين هو أول ما يتبادر إلى ذهنك؛ فمع كل شهيق، يدخل جسدَك ملايينُ مليارات المليارات من ذرات الأكسجين، وهو ما يفعله الخمسة مليارات شخص الذين يعيشون على سطح الكوكب، إضافةً إلى عدد لا يُحصَى من الحيوانات، كما يتبقَّى الكثير والكثير من ذرات الأكسجين لتأدية أعمال أخرى.

ومع الزفير، تخرج هذه الذرات من جسدك بصحبة ذرات الكربون، مكوِّنةً جزيئات من ثاني أكسيد الكربون؛ ذلك الوقود الذي تعيش عليه الأشجار والنباتات. أعداد هذه الذرات هائلة، ويشغل عنصُرَا الأكسجين والكربون مكانًا في القاموس اللغوي لكل شخص. قارِنْ هذا بعناصر كالأستاتين أو الفرانسيوم؛ فحتى لو كنتَ قد سمعتَ بهذين العنصرين من قبلُ، فمن غير المرجَّح أن تكون قد صادفت أيهما في الطبيعة؛ إذ يقدَّر أن ثمة أقلَّ من أوقية واحدة من الأستاتين في قشرة الأرض، أما الفرانسيوم فقد زُعِم أنه في أي لحظة بعينها لا يوجد منه إلا نحو ٢٠ ذرة على الأرجح في العالم حولنا.

الذرة هي أصغر جزء من العنصر يمكن التعرُّف منه على هوية هذا العنصر. وأغلب هذه العناصر — على غرار الأكسجين الذي تتنفَّسه والكربون الموجود في جلدك — تَكوَّن في النجوم منذ نحو خمسة مليارات عام، حين كانت الأرض في طور التكوين. الهيدروجين والهليوم أقدم من ذلك؛ فأغلب ذرات الهيدروجين تكوَّنَتْ بعد الانفجار العظيم بوقت يسير، ثم وفَّرَتْ بعد ذلك الوقود للنجوم، التي تكوَّنَتْ داخلها بقية العناصر الأخرى.

فكِّرْ ثانيةً في نَفَسٍ من الأكسجين وما يدخل إلى رئتيك من ملايين مليارات المليارات من الذرات. هذا من شأنه أن يمنحك فكرةً عن مدى صغر حجم الذرة. ثمة سبيلٌ آخَر ويتمثَّل في النظر إلى النقطة التي تنتهي بها هذه العبارة؛ يحتوي الحبر الذي تتكون منه هذه النقطة على ١٠٠ مليار ذرة كربون، ولرؤية إحدى هذه الذرات بالعين المجردة، ستحتاج إلى تكبير النقطة حتى يصل قُطْرها إلى ١٠٠ متر.

منذ مائة عام كان من المعتقد أن الذرات أجسام غير قابلة للاختراق، وكأنها كرات بلياردو ضئيلة الحجم، لكننا نعرف اليوم أن كلَّ ذرة لها بنية داخلية معقَّدَة. في مركز الذرة هناك النواة الكثيفة المضغوطة، التي تمثِّل كتلة الذرة كلها تقريبًا وتحمل شحنة كهربية موجبة. في النطاق الخارجي للذرة هناك جسيمات خفيفة بالغة الصغر تُسمَّى «الإلكترونات». للإلكترون شحنة سالبة، والجذب المتبادل بين الشحنتين المتعارضتين هو ما يُبقِي الإلكتروناتِ السالبةَ الشحنةِ على دورانها حول النواة المركزية الموجبة الشحنة.

انظر إلى النقطة التي تنتهي بها العبارة مرة أخرى. ذكرت سلفًا أنك كي ترى إحدى الذرات بالعين المجردة ستحتاج إلى تكبير النقطة حتى يصل قطرها إلى ١٠٠ متر. هذا حجم هائل، لكن من الممكن تصوُّره. لكن كي ترى نواة الذرة، ستحتاج إلى تكبير النقطة إلى أن يصل قطرها إلى ١٠ آلاف كيلومتر؛ أي يصير قطرها مماثلًا لقطر الأرض من القطب للقطب.

المساحة بين النواة المركزية المضغوطة والإلكترونات البعيدة التي تدور حولها تتألف في الأغلب من فضاء خاوٍ. هذا ما تؤكِّده كُتُبٌ عدة، وهو أمر صحيح من منظور الجسيمات التي تؤلِّف الذرات، بَيْدَ أن هذا نصف القصة وحسب. فهذا الفضاء مليء بمجالات كهربية ومغناطيسية قوية لدرجة تجعلها قادرة على منعك تمامًا من محاولة دخول فراغ الذرة، وهذه المجالات هي ما تعطي المادة صلابتها، حتى رغم «الخواء» الذي يُفترض أن تكون عليه ذراتها. وبينما أنت جالس تقرأ هذه الكلمات، يفصل بين جسدك وبين ذرات الكرسي الذي تجلس عليه مسافة قدرها ذرة واحدة بفعل هذه القوى.

رغم ما عليه هذه القوى الكهربية والمغناطيسية من شدة، إلا أنها تافهة للغاية مقارنةً بالقوى العاملة بالفعل داخل نواة الذرة. فإذا تمكَّنَّا من خلخلة تأثيرات هذه القوى العاتية فسيكون بمقدورنا إطلاق العِنان للقوة النووية، وإذا تمكَّنَّا من خلخلة القوتين الكهربية والمغناطيسية فسنحصل على تأثيرات الحياة الكيميائية والبيوكيميائية المحيطة بنا في كل مكان. هذه التأثيرات اليومية تحدث بسبب الإلكترونات الموجودة في النطاقات الخارجية للذرات، بعيدًا عن النواة. قد تتبادل الإلكترونات الموجودة في الذرات المتقاربة أماكنها، وبذا تتكون الجزيئات. إن الأعمال المذهلة لهذه الإلكترونات هي عصب علم الكيمياء، وعلم الأحياء، والحياة إجمالًا. هذا الكتاب لا يدور حول هذه الموضوعات التي تتعامل مع السلوك الجمعي للذرات المتعددة، بل على العكس، نحن نريد أن نُبحِر داخل الذرة ونفهم ما يوجد بها.

داخل الذرة

يبدو الإلكترون جسيمًا أساسيًّا غير قابل للتقسيم بحق، ولم يحدث بعدُ أن اكتشفنا أي بنية أصغر خاصة به. لكن النواة المركزية تتكون من جسيمات أخرى أصغر، هي «البروتونات» و«النيوترونات».

البروتون موجب الشحنة، وهو مصدر الشحنة الموجبة الإجمالية للنواة، وكلما زاد عدد البروتونات الموجودة داخل النواة زادت شحنتها، وبالتبعية زاد عدد الإلكترونات التي يمكنها الدوران حولها، وذلك من أجل تكوين ذرَّة تتساوى فيها الشحنتان الموجبة والسالبة، بحيث تصير شحنتها الكليَّة متعادلة. ولهذا رغم شدة القوى الكهربية العاملة داخل الذرات التي تتكون منها أجسادنا، فإننا لا نعيها تقريبًا، وليس للجسم البشري شحنة كهربية. تتكون ذرة أبسط العناصر — الهيدروجين — من بروتون واحد وإلكترون

واحد. وعدد البروتونات داخل النواة هو ما يميِّز أي عنصر عن غيره؛ فتتكون نواة الكربون من ستة بروتونات، ونواة الحديد من ستة وعشرين بروتونًا، ونواة اليورانيوم من ٩٢ بروتونًا.

الشحنات المتباينة تتجاذب، بينما الشحنات المتشابهة تتنافر؛ لذا من قبيل العجب أن تتمكَّن البروتونات — التي تتنافر مع بعضها بفعل هذه الشحنة الكهربية — من البقاء معًا في حيِّز النواة. سبب هذا هو أنه عندما يتلامس بروتونان، فإنه يمسك بعضُهما ببعض بإحكام بفضل ما يُعرَف باسم القوة النووية الشديدة (أو التفاعل القوي)، هذه القوة الجاذبة أقوى كثيرًا من التنافر الكهربي، ومن ثَمَّ فهي السبب الذي يجعل أنوية ذراتنا لا تنفجر على نحو تلقائي. ومع ذلك، ليس من الممكن حشد عدد كبير للغاية من البروتونات في مساحة ضيقة؛ ففي النهاية يصير التنافر الكهربي عظيمًا لدرجة لا تُحتمَل. وهذا أحد الأسباب وراء احتواء نواة أثقل العناصر الموجودة بصورة طبيعية — اليورانيوم — على ٩٢ بروتونًا فقط في كل نواة، فإذا حشدت المزيد من البروتونات معًا فلن تتمكن النواة من البقاء. وفيما وراء اليورانيوم هناك عناصر أخرى عالية النشاط الإشعاعي، على غرار البلوتونيوم الشهير بعدم استقراره.

تحتوي أنوية العناصر كلها، خلا الهيدروجين، على نيوترونات إلى جانب البروتونات. والنيوترونات هي نسخة محايدة الشحنة الكهربية من البروتونات؛ إذ إنها تضاهي البروتونات حجمًا، كما أن كتلتها تقترب حتى كسر بسيط من المائة من كتلة البروتونات. تتماسك النيوترونات معًا بنفس القوة التي تتماسك بها البروتونات، ولأنها متعادلة الشحنة فإنها لا تعاني من أي خلل كهربي، على العكس من البروتونات. نتيجةً لذلك، تضيف النيوترونات إلى كتلة النواة، وإلى القوة النووية الشديدة الجاذبة الكلية، وبهذا تساعد في استقرار النواة.

حين تكون النيوترونات في هذه البيئة — كما الحال حين تكون جزءًا من ذرة حديد — يمكنها البقاء دون تغيُّر لمليارات الأعوام. لكن بعيدًا عن مثل هذا التجمُّع المتماسك، يتسم النيوترون المنفرد بعدم الاستقرار. فهناك قوة واهنة تسمى القوة النووية الضعيفة (أو التفاعل الضعيف)، من تأثيراتها تدمير النيوترون وتحويله إلى بروتون. ويمكن أن يحدث هذا حين يُحشَد الكثير من النيوترونات إلى جانب البروتونات داخل النواة. وتأثير هذا التحويل هو تغيير نواة عنصر إلى نواة عنصر آخَر. هذا التحويل هو أساس النشاط الإشعاعي والقوة النووية.

إذا عمدت إلى تكبير النيوترون أو البروتون آلاف المرات، فستلحظ أن لهما بنية داخلية غنية. فالبروتون والنيوترون يشبهان سرب النحل، الذي حين يُرَى عن بُعْد يُعتقَد أنه بقعة واحدة داكنة، بينما حين يُرَى عن قرب يتبيَّن أنه سحابة تعجُّ بالطاقة. فعند التصوير على طاقة منخفضة سيبدوان أشبه بنقاط بسيطة، لكن عند النظر إليهما بميكروسكوب عالي الدقة، يتضح أنهما يتألفان من عناقيد من جسيمات أصغر تُسمَّى «الكواركات».

لنستعِنْ بتشبيه النقطة الموضوعة في نهاية العبارة مرةً أخيرة. لقد تعيَّنَ علينا تكبيرها إلى قطر ١٠٠ متر حتى نرى الذرة، وإلى قطر كوكب الأرض حتى نرى النواة، لكن للكشف عن الكواركات سنحتاج إلى تكبير النقطة حتى المسافة إلى القمر، ثم تكرار ذلك عشرين مرةً. باختصار: البنية الأساسية للذرة تتخطى حدود الخيال.

من واقع معرفتنا الحالية، لقد وصلنا أخيرًا إلى الجسيمات الجوهرية للمادة، فالإلكترونات والكواركات تشبه أبجدية الطبيعة؛ أي القطع الأساسية التي منها يتألف كل شيء آخَر. وإذا كان هناك وجود لشيء أكثر جوهرية، مثل النقطة والشرطة التي تتألف منها شفرة مورس، فلسنا نعلم على وجه اليقين ماهيته. يرى البعض أننا لو كبَّرنا الإلكترون أو الكوارك بمقدار مليار مليار مرة، فسنكتشف أن شفرة مورس الكامنة هي أشبه بالأوتار التي تتذبذب في كونٍ به من الأبعاد ما هو أكثر من الأبعاد الثلاثة المكانية والبعد الزمني المألوفة لدينا.

لا يزال إثبات هذا الافتراض أو نفيه أمرًا يحمله المستقبل، لكني أود أن أخبرك شيئًا عن الكيفية التي تعرَّفنا بها على الإلكترون والكوارك؛ عن ماهيتهما، وكيفية تصرفهما، وعن الأسئلة التي تواجهنا.

القوى

إذا أمكن تشبيه الإلكترون والكوارك بالحروف، فثمة تشبيه مماثل للقواعد اللغوية؛ تلك القواعد التي تربط بين الحروف لتحوِّلها إلى كلمات، وعبارات، وأدب. وفي كوننا، ذلك الرابط هو ما نسميه القوى الأساسية. هناك أربع قوى أساسية، أشهرها قوة الجاذبية، والجاذبية هي القوة المهيمنة على المادة الكثيفة (المادة في أحجامها الكبيرة). تترابط أجزاء المادة بعضها ببعض بواسطة القوة الكهرومغناطيسية، وهذه القوة هي التي تُبقِي على الإلكترونات داخل الذرات وتربط بين الذرات بعضها ببعض لتكوين الجزيئات والبنى الأخرى الأكبر. أما داخل النواة وحولها فنجد القوتين الأخريين: القوة النووية الشديدة،

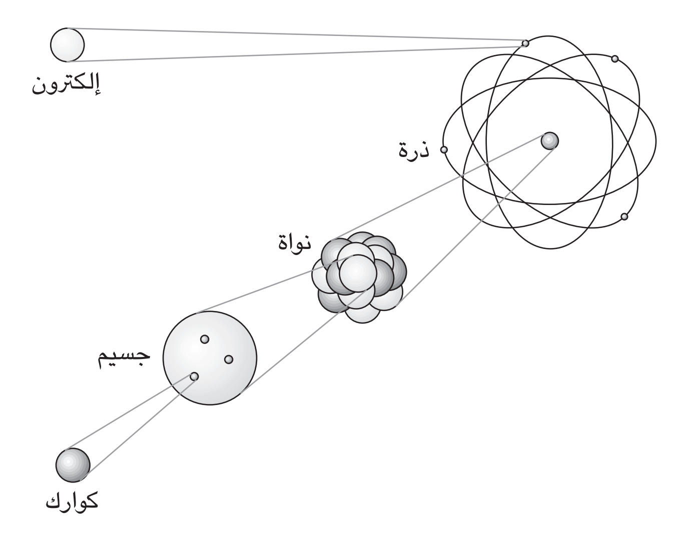
والقوة النووية الضعيفة. تربط القوة النووية الشديدة بين الكواركات لتكوِّن الكريات الصغيرة التي نسمِّيها البروتونات أو النيوترونات، وهذه البروتونات والنيوترونات تتماسك بدورها في إحكامٍ مشكِّلَةً نواة الذرة. أما القوة النووية الضعيفة فتغيِّر الجسيم من نوع إلى آخَر، كما يحدث في بعض صور النشاط الإشعاعي؛ فتستطيع هذه القوة تغيير البروتون إلى نيوترون — أو العكس — وهو ما يؤدي إلى تحويل العناصر. وأثناء قيامها بذلك هي أيضًا تحرِّر جسيمات تُعرَف باسم النيوترينوات. والنيوترينوات جسيمات خفيفة متعادلة الشحنة سريعة الزوال، لا تستجيب إلا للقوة النووية الضعيفة وقوة الجاذبية. تمر ملايين من هذه الجسيمات خلالك في هذه اللحظة، ويأتي بعضها من النشاط الإشعاعي الطبيعي للصخور الموجودة تحت قدميك، فيما يأتي أغلبها من الشمس بعد أن تكوَّنت داخل أتونها النووي المركزي، بل إن مصدر بعضها هو الانفجار العظيم نفسه.

فيما يخص المادة الموجودة على الأرض، وأغلب ما يمكننا رؤيته في الكون، هذه هي الشخصيات الرئيسة التي ستحتاج إلى مقابلتها. فلتكوين كل شيء موجود حولنا، سنحتاج إلى تلك المكونات الأساسية المتمثِّلة في الإلكترونات والنيوترينوات، إضافةً إلى نوعين من الكواركات هما الكواركات العلوية والسفلية، وهما أساس النيوترونات والبروتونات التي تتألف منها نواة الذرة. تؤثِّر القوى الأساسية على هذه الجسيمات الأساسية بطرق انتقائية، بحيث تبنى المادة الكثيفة إلى أن تصل في النهاية إلى تكوين البشر أمثالك وأمثالي، والعالم حولنا، وأغلب الكون المرئي.

لما كانت الصورة تغني عن ألف كلمة، سألخِّص لك القصة التي حكيناها إلى الآن في هذين الشكلين اللذين يوضحان البنية الداخلية للذرة وقوى الطبيعة.

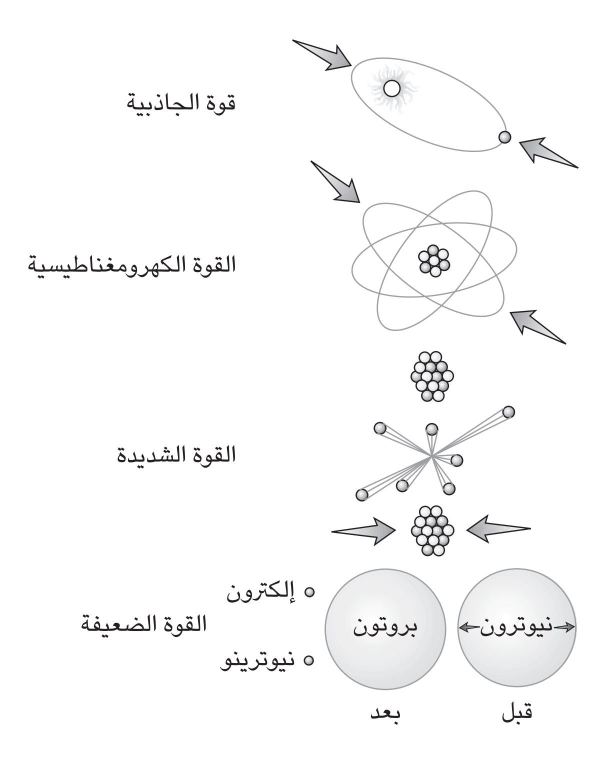
كيف نعرف هذا؟

جزء مهم في قصتنا يتمثَّل في كيفية معرفتنا بهذه الأشياء. للتعرُّف على كوننا على جميع المستويات — بدايةً من المسافات الشاسعة التي تفصلنا عن النجوم، وحتى المسافات الصغيرة على نحو يستحيل تخيُّله الموجودة داخل نواة الذرة — سنحتاج إلى مضاعفة حواسنا بمساعدة بعض المعدات. تمكِّننا التليسكوبات من النظر بعيدًا، بينما تكشف الميكروسكوبات عما تكون عليه الأشياء على مسافات صغيرة. بَيْدَ أن النظر داخل نواة الذرة يتطلَّب نوعًا خاصًّا من الميكروسكوبات يُعرَف بمعجِّلات الجسيمات التي يتم داخلها — بواسطة المجالات الكهربية — تعجيل جسيمات ذات شحنة كهربية على غرار



شكل ١-١: داخل الذرة. تتكون الذرة من إلكترونات تدور عن بُعْد حول نواة مركزية ضخمة. تتكون النواة من بروتونات ونيوترونات. البروتونات موجبة الشحنة، أما النيوترونات فمتعادلة الشحنة. البروتونات والنيوترونات بدورهما تتكونان من جسيمات أصغر تُسمَّى الكواركات. وفق أفضل ما أجرينا من تجارب، يبدو أن الإلكترونات والكواركات هي الجسيمات الأساسية التي لا تتكون من أي مكونات أخرى أصغر.

الإلكترونات أو البروتونات إلى سرعات عالية تناهز سرعة الضوء، ثم جعلها تصطدم بأهداف محدَّدة من المادة أو حتى تصطدم بعضها ببعض. يمكن لنتائج عمليات الاصطدام هذه أن تكشف عن البنية العميقة للمادة. وهي لا تكشف فقط عن الكواركات التي تمثِّل أساس نواة الذرة، بل تكشف أيضًا عن أشكال مذهلة من المادة ذات أسماء عجيبة — على غرار الكواركات الغريبة والساحرة والقِمِّية والقاعية — إضافةً إلى ما يبدو كأنه أشكال أثقل للإلكترون، تُعرَف بالميوون والتاوون. لا تلعب هذه الجسيمات دورًا واضحًا في المادة التي من المعتاد أن نجدها على الأرض، وليس من المفهوم تمامًا بعدُ سببُ استخدامِ الطبيعة لها. وتُعَدُّ الإجابة على مثل هذه التساؤلات من التحديات التي تجابهنا في الوقت الحالي.



شكل ١-٢: قوى الطبيعة. قوة الجاذبية تسيطر على حركة المادة الكثيفة، على غرار المجرات والكواكب والتفاحات الساقطة. القوتان الكهربية والمغناطيسية تُبقِيان على الإلكترونات في المدارات الخارجية للذرات. يمكن أن تتَّسِما بالتجاذب أو التنافر، وتميلان إلى التعادل في المادة الكثيفة، بحيث تفسحان المجال للجاذبية كي تكون هي المهيمنة على المسافات البعيدة. القوة الشديدة تربط الكواركات بعضها ببعض، بحيث تكوِّن النيوترونات والبروتونات وغيرهما من الجسيمات. حين تتلامس البروتونات والنيوترونات تساعد قوتهما الجاذبة العظيمة على تكوين النواة المتماسكة في قلب الذرة. القوة الضعيفة يمكنها تحويل الجسيم من نوعٍ إلى آخَر. يمكن أن يتسبَّب هذا في تحويل العناصر، على غرار تحويل الهيدروجين إلى هليوم داخل الشمس.

رغم أن هذه الأشكال العجيبة من المادة ليست هي السائدة اليوم، يبدو أنها كانت وفيرة في اللحظات الأولى من عمر الكون عقب الانفجار العظيم، الذي أَذِنَ ببداية كوننا

المادي. وهذه الفكرة جاءتنا أيضًا من نتائج تجارب الجسيمات العالية الطاقة، إضافةً إلى الإدراك العميق لما تقوم به هذه التجارب. فلخمسين عامًا ركَّزَتْ فيزياءُ الجسيمات العالية الطاقةَ على الكشف عن البنية الداخلية العميقة للمادة، وفهم الأشكال العجيبة للمادة التي ظهرت على نحو غير متوقَّعٍ. وفي الربع الأخير من القرن العشرين، طوَّرنا نظرة عميقة للكون مفادها أن الكون المادي الذي نراه اليوم ظهر نتيجةَ انفجارٍ عظيم حار، وأن اصطدام الجسيمات دون الذرية قادرٌ على أن يُعِيد بصورة لحظية إنشاء الظروف التي كانت سائدةً في تلك الحقبة المبكرة للغاية من عمر الكون.

وبناءً عليه، ننظر اليوم إلى الاصطدامات بين الجسيمات العالية الطاقة باعتبارها وسيلةً لدراسة الظواهر التي سادت الكون حين كان وليدًا. فبإمكاننا دراسة الكيفية التي نشأت بها المادة، واكتشاف أنواع المادة المختلفة التي كانت موجودة وقتها؛ واستنادًا إلى هذه المعرفة يمكننا بناءُ النظرية الخاصة بكيفية تطوُّر الكون المادي من ذلك المرجل البدائي الحار وصولًا إلى الظروف الباردة الموجودة على الأرض اليوم، حيث تتألف المادة من إلكترونات، دون الحاجة إلى ميوونات وتاوونات، وحيث تتألف نواة الذرة من كواركات علوية وسفلية فقط، دون الحاجة للكواركات الغريبة أو الساحرة.

بصورة عامة للغاية، هذه قصة ما حدث. تكوَّنت المادة التي وُلِدت أثناء الانفجار العظيم من كواركات وجسيمات أشبه بالإلكترونات. فيما يخص الكواركات، تتسم الكواركات الغريبة والساحرة والقِمِّية والقاعية بعدم الاستقرار الشديد، ومن ثَمَّ فقد فَنَتْ في غضون كسر بسيط من الثانية، وحوَّلَتْها القوة الضعيفة إلى أشكال أكثر استقرارًا؛ وهي الكواركات العلوية والسفلية التي واصلت البقاء حتى يومنا هذا. وقد حدث أمر مشابه مع الإلكترون ونسختيه الأثقل؛ الميوون والتاوون. فالميوون والتاوون يتَّسِمان هما أيضًا بعدم الاستقرار، ومن ثَمَّ فقد فنيَا بفضل القوة الضعيفة وبقي الإلكترون وحده. خلال عمليات التحلل هذه أُنتِجت كميات هائلة من النيوترينوات والإشعاع الكهرومغناطيسي، وهي لا تزال تغمر أرجاء الكون بعد مرور نحو ١٤ مليار عام على مولده.

ظلت الإلكترونات والكواركات العلوية والسفلية باقيةً بينما كان الكون وليدًا حارًّا، ومع برودة الكون، التصقت الكواركات بعضها ببعض، مكوِّنةً البروتونات والنيوترونات. وقد تسبَّبت قوى الجذب المتبادلة بين هذه الجسيمات في تجميعها على صورة سُحُب شكَّلت النجوم البدائية. وبينما اصطدمت هذه الجسيمات بعضها ببعض في قلوب تلك النجوم، كوَّنت البروتونات والنيوترونات بذرة العناصر الأثقل. صارت بعض النجوم غير

مستقرة وانفجرت، مُطلِقة هذه الأنوية الذرية في الفضاء، حيث حاصرت الإلكترونات مكوِّنة ذرات المادة كما نعرفها. هذا ما نعتقد أنه حدث منذ نحو خمسة مليارات عام، حين كانت المجموعة الشمسية في طور التكوُّن، فتلك الذرات الآتية من المستعرات العظمى البائدة منذ زمن بعيد هي ما يشكِّل أجسامنا اليوم.

ما يمكننا عمله اليوم في تجاربنا هو عكس هذه العملية وملاحظة المادة وهي تعود إلى صورها البدائية الأصلية. فإذا سخَّنَّا المادة إلى بضعة آلاف درجة فستتأيَّن ذراتها؛ أي ستنفصل الإلكترونات عن الأنوية المركزية. هكذا الحال داخل الشمس؛ فالشمس بلازما؛ أي سُحُب من الإلكترونات والبروتونات ذات الشحنة الكهربية التي تدور على نحو مستقل. وفي درجات حرارة أعلى من تلك، مماثلة للظروف التي يمكن الوصول إليها في معجلات الطاقة العالية الصغيرة نسبيًّا، تتفكك الأنوية إلى مكوناتها الأساسية من بروتونات ونيوترونات. وفي ظل درجات حرارة أعلى من تلك، «تذوب» هذه الجسيمات بدورها متحوِّلة إلى بلازما من الكواركات الحرة الحركة.

كيف حدث كل هذا؟ وكيف نعرفه؟ وما الذي اكتشفناه؟ هذه الأسئلة هي محور هذه المقدمة القصيرة جدًّا.

الفصل الثاني

ما مدى صغر ما هو صغير، وكبر ما هو كبير؟

الذرات صغيرة للغاية، بينما الكون كبير للغاية. كم يبلغ حجمهما مقارنة بالأشياء العادية؟ ليس الكون على الشكل نفسه في كل مكان؛ فالشمس والنجوم أشد حرًّا بكثير من الأرض، والمادة تأخذ أشكالًا مختلفة، لكنها في نهاية المطاف لها نفس التكوين. لم يكن الكون على الشكل نفسه على مر الزمان، وقد تشكَّلَتْ بذوره الأساسية منذ نحو ١٥ مليار عام، حين وُلِد الكون في انفجار عظيم حار.

* * *

من الكواركات إلى الكويزرات

النجوم هائلة الحجم، ومرئيةٌ للعين المجردة من على مسافات بعيدة، وفي هذا تناقض صارخ مع مكوناتها الأساسية؛ الجسيمات التي تتألف منها الذرات في نهاية المطاف. فالأمر يستلزم وَضْع مليار ذرة بعضها فوق بعض حتى تبلغ طول الإنسان من القدمين إلى الرأس، ويستلزم الأمر تراص عدد مماثل من البشر فوق بعضهم البعض حتى يساوي طولهم الإجمالي طول قطر الشمس. هذا إذن يضع ميزان القياس البشري في منتصف المسافة تقريبًا بين الشمس والذرة. أما الجسيمات التي تتألف منها الذرات — الإلكترونات التي تكوِّن النطاق الخارجي للذرة والكواركات التي تشكِّل النواة المركزية — فهي أصغر مليار مرة من إجمالي حجم الذرة نفسه.

يقل طول الإنسانِ البالغِ عن المترين بقليل، وفي أغلب ما سنتعرض له بالذكر في هذا الكتاب، تُعَدُّ القيم الأسيَّة أكثر أهمية من القيم الدقيقة. لذا، لكي نحدِّد مقياسنا،

سأفترض أن البشر يبلغ طولهم نحو متر واحد من حيث «القيمة الأُسية» (وهو ما يعني أن طولهم أكبر بكثير من ١ / ١٠ أمتار، أو $١٠^{-١}$ أمتار، وبالتبعية أقل من ١٠ أمتار). إذن، بالانتقال إلى المقاييس الفلكية الكبيرة، نجد أن قطر كوكب الأرض يبلغ نحو $١٠^{٧}$ أمتار (أي ١ متبوعًا بسبعة أصفار)، وأن قطر الشمس يبلغ $١٠^{٩}$ أمتار، وأن مدارنا حول الشمس يبلغ $١٠^{١١}$ أمتار (أو بالوحدات السهلة القراءة، ١٠٠ مليون كيلومتر). للإشارات اللاحقة، ضع في اعتبارك أن أحجام الأرض والشمس ومدارنا حول الشمس تتضاعف بمعامل قدره نحو ١٠٠.

المسافات الأبعد من هذا تزداد استعصاءً على التصور؛ إذ يبلغ عدد أصفارها عددًا كبيرًا للغاية عند التعبير عنها بالأمتار، لذا تُستخدَم وحدة قياس جديدة، وهي السنة الضوئية. ينتقل الضوء بسرعة قدرها ٣٠٠ ألف متر في الثانية. هذه سرعة كبيرة، لكنها ليست لانهائية؛ إذ يستغرق الضوء نانو ثانية، أي $١٠^{-٩}$ ثوانٍ، للانتقال مسافة قدرها ٣٠ سنتيمترًا، أو ما يعادل طول قدمك. تعمل أجهزة الكمبيوتر بهذه المقاييس الزمنية، وستصير هذه الأزمنة الدقيقة ذات أهمية محورية حين ندخل عالم الذرة. أما الآن، نحن نتَّجِه في الاتجاه المعاكس، صوب المسافات الكونية الشاسعة، والأزمنة الطويلة التي يستغرقها الضوء للانتقال من المجرات البعيدة إلى أعيننا على كوكب الأرض.

يستغرق الضوء ثماني دقائق ليقطع المائة والخمسين مليون كيلومتر التي تفصلنا عن الشمس؛ لذا نقول إن الشمس تبعد عنا مسافة ثماني دقائق ضوئية. يستغرق الضوء عامًا واحدًا لقطع مسافة قدرها $١٠^{١٦}$ أمتار، لذا تسمى هذه المسافة السنة الضوئية. تمتد مجرتنا، مجرة درب التبانة، على مساحة قدرها $١٠^{٢١}$ أمتار، أو نحو ١٠٠ ألف سنة ضوئية. تتجمع المجرات معًا في عناقيد مجرية تمتد عبر ١٠ ملايين سنة ضوئية، وهذه العناقيد نفسها تتجمع في عناقيد فائقة، تمتد على مساحة قدرها نحو ١٠٠ مليون سنة ضوئية (أو $١٠^{٢٤}$ أمتار). أما الكون المنظور فيمتد عبر مساحة قدرها ١٠ مليارات سنة ضوئية، أو $١٠^{٢٦}$ أمتار. هذه الأرقام الفعلية لا تحمل أهمية كبيرة في حد ذاتها، لكن المهم أن تلاحظ كيف أن الكون ليس متجانسًا، بل تتجمع كتلته في بِنى منفصلة: عناقيد مجرية فائقة، وعناقيد مجرية، ومجرات منفردة كمجرتنا، وكل منها يبلغ نحو ١ / ١٠٠ من حجم سابقه. وحين ندخل عالم المسافات الدقيقة سنقابل مجدَّدًا مثل هذه الطبقات من البنى، لكن على مقياس أكثر خواءً بكثير، ليس ١ / ١٠٠، بل نحو ١ / ١٠٠٠٠٠.

بعد هذه الرحلة القصيرة في النطاقات المكانية الكبيرة، دعونا نذهب في الاتجاه المعاكس نحو عالم الذرة الميكروسكوبي، وبنيتها الداخلية. نستطيع بأعيننا المجردة

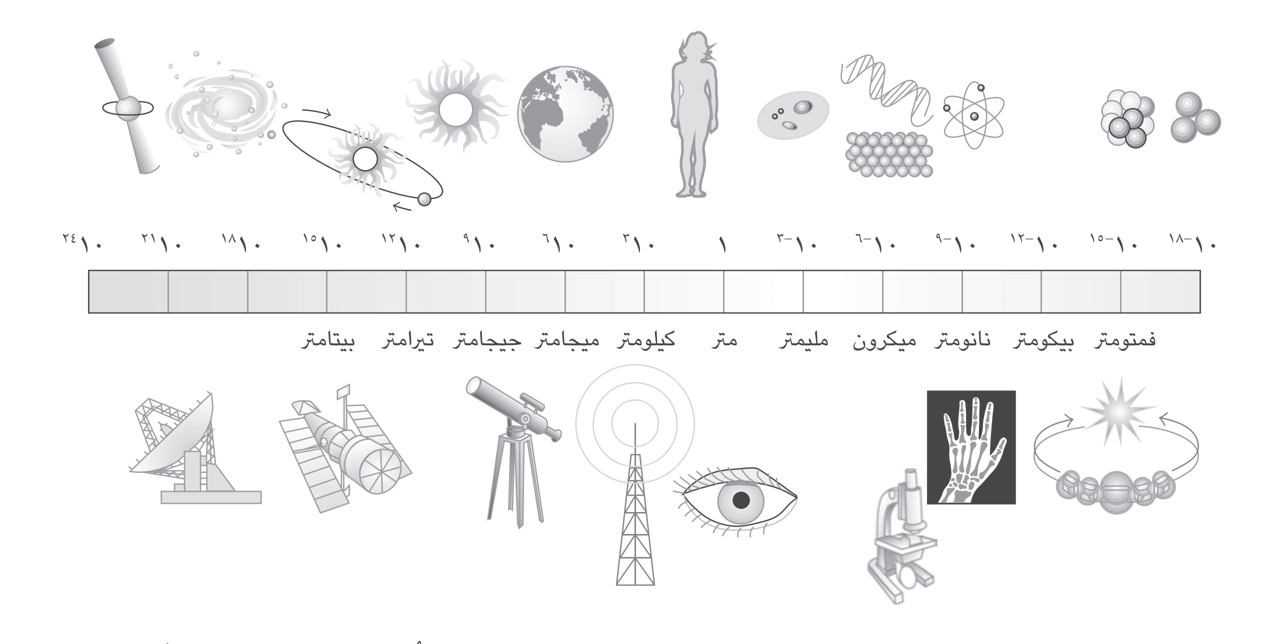
تمييزَ حبيبات الغبار المنفردة التي يصل حجمها — مثلًا — من واحد على عشرة إلى واحد على المائة من المليمتر: أي $١٠^{-٤}$ إلى $١٠^{-٥}$ أمتار، وهذا يساوي حجم أكبر البكتيريا حجمًا. الضوء شكل من أشكال الموجات الكهرومغناطيسية، والطول الموجي للضوء المرئي الذي نستطيع رؤيته يمتد عبر مسافة قدرها من $١٠^{-٦}$ إلى $١٠^{-٧}$ أمتار. أما الذرات فهي أصغر ألف مرة من هذا؛ إذ يبلغ حجمها نحو $١٠^{-١٠}$ أمتار. ولأن الذرات أصغر كثيرًا من الطول الموجي للضوء المرئي تعجز أعيننا المجردة عن رؤيتها.

كل شيء على الأرض مكوَّن من ذرات، وكل عنصر مكوَّن من ذرات تمثِّل أصغر أجزائه، وهي صغيرة للغاية بحيث تستحيل على العين رؤيتها، لكن وجودها لا مراء فيه، وهو ما تبيِّنه لنا معداتنا الخاصة.

كما ذكرنا في الفصل الأول، تتألف الذرات من جسيمات أصغر، فالإلكترونات تدور في نطاقاتها الخارجية البعيدة، بينما في قلوبها تقبع الأنوية الضخمة المتماسكة. للنواة بنية خاصة بها؛ إذ تتكون من بروتونات ونيوترونات، وهذه البروتونات والنيوترونات تتألف بدورها من جسيمات أصغر حجمًا؛ أَلَا وهي «الكواركات»، والكواركات والإلكترونات هما بذور المادة الموجودة على الأرض.

بينما يبلغ قطر الذرة في المعتاد $١٠^{-١٠}$ أمتار، يبلغ قطر نواتها نحو $١٠^{-١٤}$ إلى $١٠^{-١٥}$ أمتار؛ لذا توخَّ الحذرَ من التشبيه الشائع الذي يقول إن الذرة أقرب إلى مجموعة شمسية صغيرة للغاية تدور فيها «الإلكترونات الكوكبية» حول «الشمس النووية». ففي المجموعة الشمسية الفعلية تبلغ النسبة بين حجم الشمس التي تحتل المركز وبين مدار كوكبنا ١ : ١٠٠، بينما الذرة أكثر خواءً بكثير؛ إذ تبلغ النسبة بين مساحة نواتها المركزية وبين قطرها ١ : ١٠٠٠٠٠. ويتواصل هذا الخواء؛ إذ يبلغ قطر البروتونات والنيوترونات المنفردة نحو $١٠^{-١٥}$ أمتار، وهي بالتبعية مؤلَّفة من جسيمات أصغر حجمًا تُعرَف بالكواركات. وإذا كانت الكواركات والإلكترونات لهما أي أحجام فعلية، فهي صغيرة للغاية بحيث يستحيل علينا قياسها. كل ما يمكننا قوله على وجه اليقين هو أنها ليست أكبر من $١٠^{-١٨}$ أمتار. وهكذا مجدَّدًا نرى أن الحجم النسبي للكوارك إلى البروتون يبلغ نحو ١ : ١٠٠٠ (على الأكثر!) والأمر عينه ينطبق على الإلكترونات «الكوكبية» نسبة إلى البروتونات «الشمسية»؛ إذ تبلغ النسبة ١ : ١٠٠٠٠٠ بدلًا من «مجرد» ١ : ١٠٠ كما الحال في المجموعة الشمسية الحقيقية. إذن العالم داخل الذرة خاوٍ على نحوٍ لا يُصدَّق.

للإحساس بهذا الفارق المهول في الحجم، تصوَّرْ أطول مسافةٍ من المرجَّح أن تجدها بين حفرتين في ملعب جولف، والتي يبلغ طولها مثلًا ٥٠٠ متر. تبلغ النسبة بين طول



شكل ٢-١: مقارنات بين النطاق البشري وما وراء الرؤية الطبيعية. على النطاقات الصغيرة تُعرَف المسافة البالغة $١٠^{-٦}$ أمتار باسم ١ ميكرون، والمسافة البالغة $١٠^{-٩}$ أمتار تُعرَف باسم ١ نانومتر، فيما تُعرَف المسافة البالغة $١٠^{-١٥}$ أمتار (الفمتومتر) باسم ١ فيرمي.

هذه المسافة وبين حجم الحفرة الصغيرة التي ستضع بها الكرة نحو ١:١٠٠٠٠، ومن ثَمَّ فهي تقارب النسبة بين قطر ذرة الهيدروجين ونواتها المركزية؛ البروتون.

تتسم المسافات الكبيرة للغاية بالغرابة عندما يتم التعبير عنها بالأمتار، وينطبق الأمر عينه على الأبعاد دون الميكروسكوبية للبنى الذرية والنووية. في حالة المسافات الكبيرة استحدثنا مصطلح السنة الضوئية، وقدرها ١٠^١٦ أمتار، لكن في حالة المسافات الفائقة الصغر من المعتاد أن نستخدم الأنجستروم، ورمزه A، بحيث إن ١ أنجستروم = ١٠^-١٠ أمتار (وهو في المعتاد حجم الذرة البسيطة)؛ وأن نستخدم أيضًا الفيرمي، ورمزه fm، بحيث إن ١ فيرمي = ١٠^-١٥ أمتار. وبهذا يصير الأنجستروم وحدة ملائمة لقياس أحجام الذرات والجزيئات، فيما يُعَدُّ الفيرمي وحدة القياس الطبيعية للأنوية والجسيمات. (أنجستروم وفيرمي هما عالمان ذريان ونوويان شهيران في القرن التاسع عشر والقرن العشرين على الترتيب.)

ترى أعيننا الأشياء في نطاقات الحجم البشرية، فقد طوَّر أسلافنا الحواس التي من شأنها أن تحميهم من هجوم الضواري، ومن ثَمَّ لم تكن هناك حاجة لأن ترى أعيننا المجرات التي تنبعث منها موجات الراديو، أو الذرات التي يتكوَّن منها حمضنا النووي. واليوم، يمكننا استخدام المعدات بغرض بَسْط نطاق حواسنا: على غرار التليسكوبات التي تدرس أعماق الفضاء والميكروسكوبات التي تكشف عن البكتيريا والجزيئات. ولدينا «ميكروسكوبات» خاصة تكشف عن المسافات الأصغر من الذرة، ونعني بهذا معجلات الجسيمات عالية الطاقة؛ فبواسطة هذه الأداة يمكننا الكشف عن الطبيعة على امتداد نطاقٍ شاسعٍ من المسافات المتدرجة. وسنناقش كيف يتم هذا في الفصلين الخامس والسادس.

الكون من حيث درجة الحرارة والزمن

هذا ما عليه الحال الآن، بَيْدَ أن الحال لم يكن كذلك على الدوام؛ فالكون — كما نعرفه — بدأ بانفجار عظيم حار لم يكن بإمكان الذرات أن تبقى فيه. واليوم، بعد مرور ١٤ مليار عام، الكون كبير وبارد للغاية وبإمكان الذرات البقاء فيه. هناك مواضع حارة بعينها — على غرار النجوم كشمسنا — تختلف فيها المادة عن المادة الموجودة على أرضنا الباردة نسبيًّا. بوسعنا محاكاة الظروف المتطرفة التي سادت في اللحظات التي أعقبت الانفجار العظيم مباشرة، وذلك في التجارب المجراة في معجلات الجسيمات، بحيث نرى

كيف ظهرت البذور الأولى للمادة. لكن رغم أن الأشكال التي تتخذها تلك المادة تتباين مع اختلاف المكان والزمن، إلا أن المكونات الأساسية واحدة. ويهدف هذا القسم إلى تبيان الكيفية التي تبدو عليها المادة في الأحوال الباردة (وقتنا الحالي)، والحارة (كما في الشمس والنجوم)، والفائقة الحرارة (كما في أعقاب الانفجار العظيم).

في فيزياء العالم المرئي للعين المجردة، وحدات الطاقة المستخدمة هي الجول، وفي الصناعات الواسعة النطاق نستخدم الميجا جول أو التيرا جول. أما في الفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات تكون الطاقات المستخدمة تافهة للغاية مقارَنَةً بهذه الوحدات. إذا جرى تعجيل الإلكترون، ذي الشحنة الكهربية، بواسطة مجال كهربي لبطارية قدرتها واحد فولت، فسيكتسب الإلكترون طاقة قدرها $١٫٦ \times ١٠^{-١٩}$ جول. وحتى عند التعجيل إلى سرعات تناهز سرعة الضوء، كما الحال في المعجلات الموجودة في سيرن بجنيف، لا تصل الطاقة إلا إلى $١٠^{-٨}$ جول؛ أي واحد على مائة مليون من الجول. يصعب للغاية التعامل مع هذه الأرقام الصغيرة؛ لذا من المعتاد استخدام مقياس مختلف، يُعرَف باسم «الإلكترون فولت»، أو eV. ذكرنا للتو أن الإلكترون حين يجري تعجيله بواسطة مجال كهربي لبطاريةٍ قُدرتها واحد فولت، فإنه سيكتسب طاقة قدرها $١٫٦ \times ١٠^{-١٩}$ جول، وهذا المقدار هو ما نسميه واحد إلكترون فولت.

الآن صار من اليسير التعامل مع كميات الطاقة التي تنضوي عليها فيزياء الجسيمات دون الذرية. يسمى المقدار $١٠^{٣}$ إلكترون فولت باسم كيلو إلكترون فولت، أو KeV، والمقدار $١٠^{٦}$ إلكترون فولت (مليون إلكترون فولت) يسمى ميجا إلكترون فولت، أو MeV، والمقدار $١٠^{٩}$ إلكترون فولت (مليار إلكترون فولت) يسمى جيجا إلكترون فولت، أو GeV، وتشارف أحدث التجارب الدخول إلى نطاق $١٠^{١٢}$ إلكترون فولت، أو التيرا إلكترون فولت، TeV.

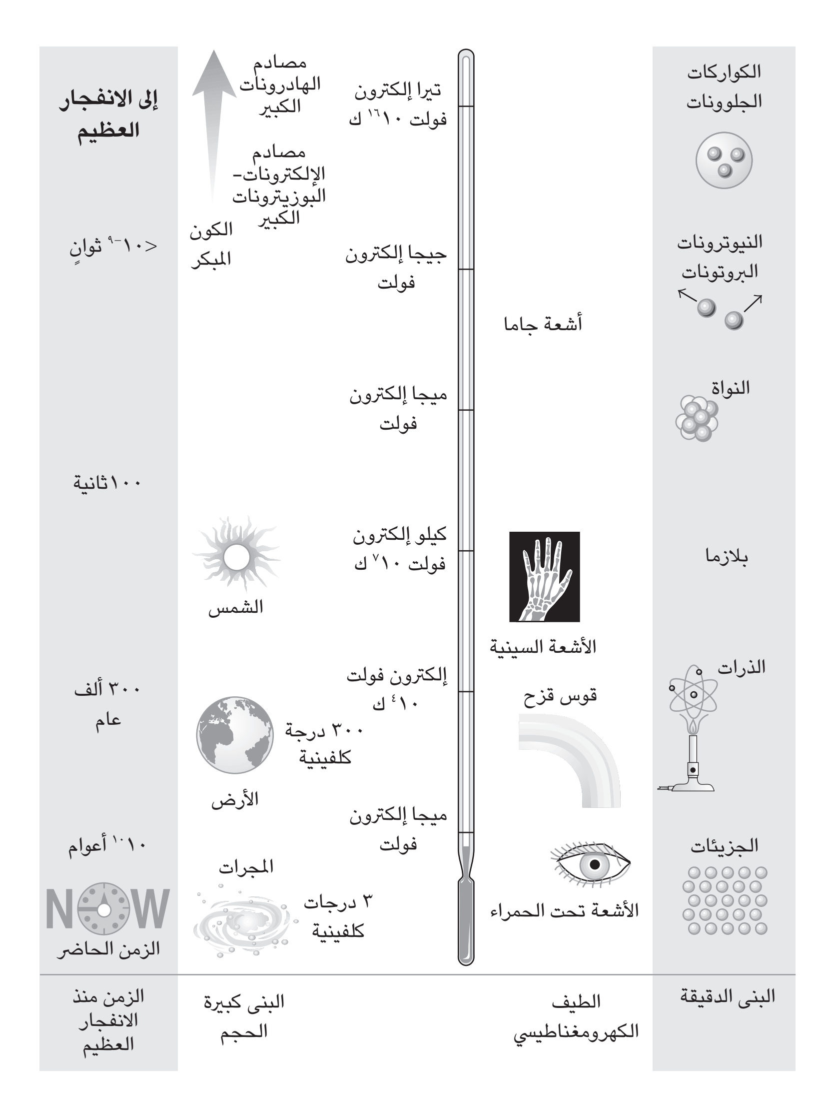
تخبرنا معادلة أينشتاين الشهيرة؛ الطاقة = الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء، $E = mc^2$، بأن الطاقة يمكن تحويلها إلى كتلة، والعكس بالعكس، على أن يكون معدل التحويل هو مربع سرعة الضوء c^2. للإلكترون كتلة قدرها ٩×١٠^{-٣١} كيلوجرامات. وهنا أيضًا يصعب للغاية التعامل مع هذه الأرقام، ولهذا نستخدم معادلة أينشتاين لتحديد الكتلة والطاقة، وبتطبيق هذا المعيار توصَّلنا إلى أن طاقة الإلكترون المنفرد في حالة سكون تبلغ ٠٫٥ ميجا إلكترون فولت؛ ومن ثَمَّ من المعتاد أن نقول إن كتلته تبلغ نصف ميجا إلكترون فولت مقسومة على مربع سرعة الضوء، أو $0.5\,\text{MeV}/c^2$.

وبهذه الوحدات تكون كتلة البروتون ٩٣٨ ميجا إلكترون فولت مقسومة على مربع سرعة الضوء، أو $938\,\mathrm{MeV}/c^2$؛ أي واحد جيجا إلكترون فولت تقريبًا.

الطاقة مرتبطة عن كَثَب بدرجة الحرارة أيضًا. وإذا كان لديك عدد كبير من الجسيمات يتصادم بعضه ببعض، بحيث تنتقل الطاقة من كل جسيم إلى الجسيم المجاور بما يجعل درجة الحرارة الكلية ثابتة، يمكن التعبير عن متوسط طاقة الجسيم المنفرد بالإلكترون فولت (أو الكيلو إلكترون فولت وهلم جرًّا). تعادل درجة حرارة الغرفة نحو ١ / ٤٠ إلكترون فولت، أو ٠٫٠٢٥ إلكترون فولت، وربما كان من الأيسر استخدام المقياس ١ إلكترون فولت ≑ ١٠^٤ك (حيث يشير الاختصار «ك» إلى درجة كلفينية، وهي المقياس المطلق لدرجة الحرارة، وتساوي درجة الصفر المطلق الكلفينية −٢٧٣ درجة مئوية، وتبلغ درجة حرارة الغرفة نحو ٣٠٠ درجة كلفينية).

إذا أطلقت صاروخًا نحو الفضاء بطاقة كافية فسيفلت من قوة الجاذبية الأرضية، وبالمثل، إذا زوَّدْتَ الإلكترون بالطاقة الكافية فسيفلت من قوة الجذب الكهربي لنواة الذرة. في العديد من الجزيئات، ستتحرر الإلكترونات بواسطة طاقة مقدارها كسر بسيط من الإلكترون فولت، ومن ثَمَّ تكون درجة حرارة الغرفة كافيةً لتمكين التفاعل، وهذا هو مصدر العمليات الكيميائية والبيولوجية، والحياة. تظل ذرات الهيدروجين قادرةً على البقاء في طاقات أقل من ١ إلكترون فولت، وهو ما يقع — من حيث درجات الحرارة — في نطاق ١٠^٤ درجات كلفينية. درجات حرارة كهذه لا توجد بصورة طبيعية على الأرض (خلا بعض الأمثلة المحدَّدة على غرار بعض الأفران الصناعية، ومصابيح الكربون القوسية، والمعدات العلمية) ومن ثَمَّ فإن وجود الذرات منفردة هو المعتاد هنا. لكن في قلب الشمس، تصل الحرارة إلى ١٠^٧ درجات كلفينية — أي ما يساوي ١ كيلو إلكترون فولت من الطاقة — وفي مثل هذه الظروف لا تستطيع الذرات البقاء.

في درجات الحرارة أعلى من ١٠^{١٠} درجات كلفينية، يكون هناك ما يكفي من الطاقة لتكوين الجسيمات، كالإلكترونات. للإلكترون المنفرد كتلة قدرها نصف ميجا إلكترون فولت مقسومة على مربع سرعة الضوء، ومن ثَمَّ نحتاج إلى نصف ميجا إلكترون فولت من الطاقة لتكوين إلكترون واحد. وكما سنرى لاحقًا، لا يمكن أن يحدث هذا على نحو تلقائي، ولا بد أن يتم إنتاج الإلكترون ونظيره المضاد — البوزيترون — معًا كزوج. وهكذا نحتاج إلى ١ ميجا إلكترون فولت كي تحدث عملية «إنتاج الإلكترون والبوزيترون». وعلى نحو مشابه، نحتاج إلى ٢ جيجا إلكترون فولت من أجل إنتاج البروتون والبروتون



شكل ٢-٢: التوافق بين مستويات درجات الحرارة والطاقة بالإلكترون فولت.

المضاد. يسهل توليد مثل هذه الطاقات في المختبرات النووية ومعجلات الجسيمات اليوم، وكانت هي السائدة في المراحل المبكرة للغاية من عمر الكون، وبالفعل في هذه اللحظات المبكرة تكوَّنت جسيمات المادة (والمادة المضادة). سنتحدث عن هذا بالتفصيل في الفصل التاسع، لكن سيفيدنا توضيح الأمر الآن أيضًا.

يُظهِر الرصد أن المجرات تتباعد عن بعضها، بما يعني أن الكون يتمدَّد. ومن معدل التمدُّد يمكننا العمل على نحو عكسي عبر الزمن بحيث نستنتج أنه منذ نحو ١٤ مليار عام كان الكون منضغطًا على نفسه ثم انفجر في انفجار عظيم من هذه الحالة الكثيفة المضغوطة. (ليس الغرض الأساسي لهذا الكتاب التعرُّض للانفجار العظيم، ولمعرفة المزيد عن هذا الموضوع يمكنك قراءة كتاب بيتر كولز بعنوان «علم الكونيات» والصادر في نفس هذه السلسلة.) في هذه الحالة الأصلية، كان الكون أشد حرارة بكثير عما هو عليه اليوم. الكون اليوم مغمور بإشعاع ميكروني تبلغ حرارته نحو ٣ درجات كلفينية، والجمع بين هذا وصورة تمدُّد ما بعد الانفجار العظيم يمنحنا مقياسًا لدرجة حرارة الكون على صورة دالة زمنية.

بعد انقضاء جزء على المليار من الثانية على الانفجار العظيم، تجاوزت درجة حرارة الكون $١٠^{١٦}$ درجة كلفينية، أو بمعايير الطاقة ١ تيرا إلكترون فولت. في هذه الطاقة تم إنتاج الجسيمات والجسيمات المضادة، بما فيها الأشكال العجيبة التي لم تَعُدْ شائعة الوجود اليوم. فنيت أغلب هذه الجسيمات على الفور تقريبًا، وهو ما أنتج الإشعاع إضافةً إلى المزيد من الجسيمات الأساسية على غرار الإلكترونات والكواركات الباقية التي تؤلِّف المادة اليوم.

مع تقدُّم الكون في العمر، بردت حرارته، وحدث هذا في البداية بسرعة. ففي غضون جزء على المليون من الثانية تجمعت الكواركات معًا في مجموعات من ثلاثة، وظلت باقيةً على هذا النحو حتى الآن. وهكذا وُلِدت البروتونات والنيوترونات. وبعد نحو ثلاث دقائق، كانت درجة الحرارة قد انخفضت إلى نحو $١٠^{١٠}$ درجات كلفينية، أو بمعايير الطاقة ١ ميجا إلكترون فولت. هذه درجة حرارة «باردة» بما يكفي بحيث تلتصق البروتونات والنيوتروات معًا وتبني البذور النووية للعناصر الذرية (التي لم تكتمل بعدُ). تكوَّنت بضع أنوية خفيفة، على غرار الهليوم ومقادير ضئيلة من البيريليوم والبورون. كانت البروتونات — نظرًا لاستقرارها وكونها أبسط البنى — أكثر البنى شيوعًا، وتجمعت بفعل تأثير الجاذبية في الكرات التي نسميها النجوم. وداخل النجوم تكوَّنت أنوية العناصر

الثقيلة على مدار مليارات الأعوام. في الفصل التاسع سأصف كيف تصادمت البروتونات الموجودة داخل هذه النجوم بعضها ببعض، وتكتلت، ثم بواسطة سلسلة من العمليات كونت البذور النووية للعناصر الثقيلة: ابتداءً بالهليوم، وانتهاءً بالعناصر الأثقل على غرار الأكسجين والكربون والحديد. وحين تنفجر النجوم وتهلك، فإنها تنفث هذه البذور النووية إلى الكون، وهذا هو مصدر الكربون الذي تتكون منه أجسادنا والأكسجين الذي نتنفسه.

تمر الشمس بالجزء الأول من هذه القصة في وقتنا الحالي؛ فقد بدأت الشمس في تحويل البروتونات إلى أنوية هليوم منذ ٥ مليارات عام، واستهلكت نحو نصف وقودها بالفعل، ودرجات الحرارة في قلبها مشابهة لتلك التي كان عليها الكون المبكر، حين كان عمره بضع دقائق وحسب؛ وبهذا تقوم الشمس اليوم بما قام به الكون منذ وقت بعيد بعيد للغاية.

لا تستطيع الذرات البقاء داخل أعماق الشمس، ولم يكن بوسعها البقاء في بدايات الكون. وقد تعيَّن انقضاء ٣٠٠ ألف عام حتى برد الكون بما يكفي كي تستحوذ هذه الأنوية على الإلكترونات العابرة مكوِّنة الذرات. وهذا هو الحال في وقتنا الحالي على الأرض.

الفصل الثالث

كيف نعلم مِمَّ تتكون الأشياء، وما الذي وجدناه إلى الآن؟

تمكِّننا أدوات على غرار الميكروسكوبات ومعجلات الجسيمات من بَسْط نطاق رؤيتنا إلى ما وراء نطاق الضوء المرئي، بحيث نرى ما بداخل العالم الصغير دون الذري. وقد كشف لنا هذا عن البنية الداخلية للذرة؛ من إلكترونات وجسيمات نووية، وكواركات.

* * *

الطاقة والموجات

كي تعرف مِمَّ يتكوَّن شيء ما، يمكنك أن (أ) تنظر إليه، أو (ب) تسخنه ثم ترى ما سيحدث، أو (ج) تهشمه بقوة عاتية. ثمة صورة مغلوطة مفادها أن مختصي الفيزياء العالية الطاقة، أو فيزيائيي «الجسيمات»، يفعلون الأمر الأخير. لكن هذه الصورة تأتينا من الأيام التي كانت فيها معجلات الجسيمات تُعرَف باسم «مهشمات الذرات». وفي الواقع، من الناحية التاريخية كان هذا ما يحدث بالفعل، لكن اليوم باتت المقاصد والطرق أكثر تعقيدًا وتقدُّمًا بكثير. سنناقش هذا بالتفصيل لاحقًا، لكن كبداية، دعونا نركِّز على الخيارات الثلاثة التي ذكرناها، خاصةً أنها جميعًا تشترك في سمة عامة مشتركة؛ ألَا وهي أنها جميعًا تستخدم الطاقة.

في حالة التسخين، نحن نعرف بالفعل كيف ترتبط درجة الحرارة بالطاقة (١٠⁴ ك ⇋ ١ إلكترون فولت). وحتى عند النظر إلى الأشياء، يظل للطاقة دور تلعبه.

أنت ترى هذه الكلمات لأن الضوء يسقط على الصفحة ثم بعدها ينتقل إلى عينيك، والفكرة العامة هنا هي أن هناك مصدرًا للإشعاع (الضوء)، وجسمًا خاضعًا للدراسة (الصفحة)، وكاشفًا (عيناك). داخل النقطة التي تنتهي بها هذه العبارة هناك ملايين من ذرات الكربون، ولن تتمكَّن من رؤية الذرات المنفردة أبدًا، وإن استخدمت أقوى العدسات المكبرة؛ فهذه الذرات أصغر حجمًا من الطول الموجي للضوء «المرئي»، ومن ثَمَّ يستحيل كشفها بأي عدسة مكبرة أو ميكروسكوب.

الضوء شكل من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي، وأعيننا تستجيب فقط لجزء صغير من الطيف الكهرومغناطيسي الكامل، لكن يمكن باستخدام معدات خاصة الوصول إلى بقية هذا الطيف. الضوء المرئي هو أقوى أنواع الإشعاع الآتية من الشمس، وقد تطوَّرت أعين البشر بحيث تستجيب فقط لهذا النطاق المحدَّد. النطاق الكامل للطيف الكهرومغناطيسي موجود بالفعل، وهو ما يمكننا توضيحه بتشبيه الأمر بالصوت. تتضمن المسافة الموسيقية الواحدة تقليل الطول الموجي بمقدار النصف (أو زيادة الذبذبة الصوتية بمقدار الضعف) من نغمة صوتية بعينها (لنقل العلامة «أ» البالغ شدتها ٤٤٠ هرتزًا) إلى المسافة الصوتية الأعلى منها (العلامة «أ» البالغ شدتها ٨٨٠ هرتزًا). الأمر مشابه في قوس قزح؛ فهو بمنزلة «مسافة موسيقية» في الطيف الكهرومغناطيسي. وبينما تنتقل من الضوء الأحمر إلى الأزرق، يقل الطول الموجي بمقدار النصف، ومن ثَمَّ يبلغ الطول الموجي للون الأزرق نصف مقدار الطول الموجي للون الأحمر (أو على نحو مماثل، يتزايد المعدل الذي تتذبذب به المجالات الكهربية والمغناطيسية جيئة وذهابًا بمقدار الضعف في حالة الضوء الأزرق مقارَنَةً بالأحمر). يمتد الطيف الكهرومغناطيسي أكثر من ذلك في كلا الاتجاهين، وخلف الأفق الأزرق — حيث نجد الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية وأشعة جاما — تكون الأطوال الموجية أصغر مما الحال عليه في الضوء المرئي، وعلى النقيض، عند الأطوال الموجية الأطول في الاتجاه المقابل، ما وراء اللون الأحمر، نجد لدينا الأشعة تحت الحمراء وأشعة الميكروويف وموجات الراديو.

يمكننا استشعار الطيف الكهرومغناطيسي فيما وراء الضوء المرئي، فأعيننا تعجز عن رؤية الأشعة تحت الحمراء لكن جلودنا يمكنها الشعور بها على صورة حرارة. وبإمكان كاميرات التصوير بالأشعة تحت الحمراء الحديثة أن «ترى» المعتدين من خلال

الحرارة التي تبثها أجسادهم. إن العبقرية البشرية هي التي مكَّنَتْ من صنع آلات يمكنها بسط نطاق رؤيتنا عبر النطاق الكامل للطيف الكهرومغناطيسي، ومن ثَمَّ الكشف عن الحقائق الخفية لطبيعة الذرة.

إنَّ عَجْزنا عن رؤية الذرات إنما يرجع إلى حقيقة أن الضوء يتصرَّف كموجة، والموجات عمومًا لا تتشتت بسهولة عند تعرُّضها للأجسام الصغيرة. فلرؤية شيء ما، لا بد أن يكون الطول الموجي لشعاع الضوء أصغرَ من الشيء نفسه. ومن ثَمَّ، لرؤية الجزيئات أو الذرات نحتاج إلى إضاءة يكون طولها الموجي مماثلًا لحجم الذرات أو أصغر منه. موجات الضوء، كتلك التي تستشعرها أعيننا، لها طول موجي يبلغ نحو $١٠^{-٧}$ أمتار (أو بعبارة أخرى، يمكن حشد نحو ١٠ آلاف طول موجي في المليمتر الواحد). لا يزال هذا أكبر بنحو ألف مرة من حجم الذرة. لتخيُّل مدى صعوبة الأمر، تخيَّلِ العالَمَ وقد تضاعَفَ حجمه بمقدار ١٠ ملايين مرة. الطول الموجي الواحد للضوء، عند تكبيره عشرة ملايين مرة، سيكون أكبر من حجم الإنسان، في حين لن يزيد حجم الذرة وفق هذا المقياس عن المليمتر الواحد، وهو حجم أقل بكثير من أن يسبِّب اضطرابًا بالموجة الزرقاء الطويلة. ولهذا، كي تكون لدينا فرصة لرؤية الجزيئات والذرات سنحتاج إلى ضوء ذي طول موجي أقصر بكثير من الأطوال الموجية الحالية. علينا الذهاب فيما وراء الأفق الأزرق للضوء المرئي، نحو نطاقات الأشعة السينية وما خلفها.

الأشعة السينية هي ضوء ذو طول موجي قصير، وبذا يمكنها التشتُّت بواسطة بنى على المستوى الجزيئي، على غرار تلك الموجودة في البلورات. الطول الموجي للأشعة السينية أكبر من حجم الذرات المنفردة، لذا تظل الذرة خفية، إلا أن المسافة بين الأسطح المتجاورة في المصفوفة المعتادة داخل البلورة مقاربة للطول الموجي للأشعة السينية، ولهذا تبدأ الأشعة السينية في تمييز المواضع النسبية للأشياء داخل البلورات. يُعرَف هذا باسم «دراسة البلورات بالأشعة السينية».

يمكن العثور على تشبيه ملائم إذا فكَّرنا للحظة في موجات الماء بدلًا من الموجات الكهرومغناطيسية؛ فإذا أسقطت حجرًا في ماء راكد فستنتشر التموجات، وإذا عرضت عليك صورة لهذه الأنماط الدائرية فستتمكن من استنتاج الموضع الذي أُلقِي فيه الحجر. وإذا ألقيت مجموعة من الأحجار في تناغم فسينتج عن هذا نمط أكثر تعقيدًا للموجات، تتخلله قمم وقيعان في مواضع التقاء الموجات وتداخُلها. ومن النمط الناجم يمكنك أن تستنتج — بقدرٍ من الصعوبة نُقِرُّ به — المواضعَ التي أُسقِطت فيها الأحجار في

الماء. تتضمن دراسة البلورات بالأشعة السينية الكشفَ عن الموجات العديدة المشتتة من طبقات معتادة في البلورة، ثم تفسير النمط الناتج من أجل استنتاج البنية البلورية. وبهذه الطريقة، جرى استنتاج شكل وهيئة بعض الجزيئات البالغة التعقيد، على غرار الحمض النووي.

لسبر أغوار الذرات المنفردة سنحتاج إلى أطوال موجية أقصر من هذا، ومن الممكن عمل ذلك ليس باستخدام الضوء وحده، وإنما باستخدام حزم من الجسيمات على غرار الإلكترونات. لهذه الجسيمات مزية خاصة تتمثل في أنها ذات شحنة كهربية، ومن ثَمَّ يمكن التحكُّم فيها وتعجيلها بواسطة مجالات كهربية، وبهذا تُمنَح كميات كبيرة من الطاقة. يمكِّننا هذا من استكشاف مسافات أقصر، لكن لفهم السبب علينا التحوُّل عن سبيلنا قليلًا للتعرف على كيفية ارتباط الطول الموجي بالطاقة.

أحد أعظم اكتشافات نظرية الكم هو أن الجسيمات يمكن أن تسلك سلوك الموجات، وأيضًا — على نحو معاكس — أن الموجات يمكنها أن تسلك سلوك حزم متقطعة من الجسيمات، تُعرَف باسم «الكموم»، وبهذا تكون الموجة المُعجَّلة أشبه بدفقة من الكموم؛ أي الفوتونات. وطاقة أي فوتون منفرد تتناسب طرديًّا مع تردُّد المجالات المغناطيسية والكهربية المتذبذبة للموجة، وهذا التردد يُرمَز له بالرمز ν. ويتم التعبير عن هذا بالصورة التالية:

$$E = h\nu$$

حيث ثابت التناسب، h، هو ثابت بلانك.

يرتبط كلٌّ من طول الموجة (λ)، والتردُّد الذي تمر به القمم بأي نقطة بعينها، بسرعة الموجة، c، وفق المعادلة $\nu = c/\lambda$. وبهذا يمكن الربط بين الطاقة والطول الموجي:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

وثابت التناسب $hc \sim 10^{-6}\,\mathrm{e}V\mathrm{m}$. يمكِّننا هذا من الربط بين الطول الموجي والطاقة باستخدام قاعدة التقريب: بحيث إن ١ إلكترون فولت يتوافق مع ١٠$^{-٦}$ أمتار، وهكذا دواليك.

وبإمكانك مقارنة هذا بالعلاقة بين الطاقة ودرجة الحرارة التي ناقشناها في الفصل الثاني، بحيث ترى كيفية ارتباط درجة الحرارة بالطول الموجي. يبيِّن لنا هذا كيف أن

جدول ٣-١: الطاقة والأطوال الموجية التقريبية.

الطاقة	الطول الموجي (متر)
١ إلكترون فولت	١٠$^{-٦}$
١ كيلو إلكترون فولت	١٠$^{-٩}$
١ ميجا إلكترون فولت	١٠$^{-١٢}$
١ جيجا إلكترون فولت	١٠$^{-١٥}$
١ تيرا إلكترون فولت	١٠$^{-١٨}$

الأجسام في درجات الحرارة المختلفة تشع أطوالًا موجية مختلفة: فكلما زادت حرارة الجسم، قَصُرَ الطول الموجي؛ ولهذا — على سبيل المثال — بينما يتدفق التيار الكهربي عبر السلك ويدفئه، سيشع في البدايةِ الحرارةَ على صورة أشعة تحت حمراء، لكن بينما يزداد سخونة — بضعة آلاف من الدرجات أو نحو ذلك — سيبدأ في إشعاع الضوء المرئي ومن ثَمَّ ينير الحجرة. وبإمكان الغازات الحارة قرب الشمس أن تُطلِق الأشعة السينية، كما أن النجوم الشديدة الحرارة تُطلِق أشعة جاما.

للتعمُّق أكثر من هذا داخل الذرة، سنحتاج إلى مصدرٍ للأطوال الموجية الفائقة القِصَر. وبما أننا لا نستطيع محاكاة النجوم المطلِقة لأشعة جاما داخل المختبرات، فإننا نستخدم الجسيمات الأساسية عينها — على غرار الإلكترونات والبروتونات — ونعجلها داخل مجالات كهربية. وكلما زادت سرعتها، عظمت طاقتها وزخمها، وقصر طولها الموجي المصاحب. وهكذا تستطيع حِزَمٌ من الجسيمات العالية الطاقة استكشافَ أشياء صغيرة في حجم الذرة. وبذلك يمكننا النظر على مسافات صغيرة كما يحلو لنا، وكل ما علينا فعله هو تعجيل حركة الجسيمات، ومنحها المزيد والمزيد من الطاقة حتى تصل إلى أطوال موجية أصغر وأصغر. ولاستكشاف مسافات على مستوى نواة الذرة — ١٠$^{-١٥}$ أمتار — سنحتاج إلى طاقات على مستوى الجيجا إلكترون فولت. هذا هو مستوى الطاقة الذي نسميه فيزياء الطاقة العالية. وفي الواقع، حين بدأ ذلك المجال بجدية في بواكير القرن العشرين وحتى منتصفه، كانت الطاقات على مستوى الجيجا إلكترون فولت هي الحدود القصوى المتاحة فنيًّا، لكن بنهاية القرن العشرين، باتت الطاقات البالغة عدة مئات من الجيجا إلكترون فولت هي المعيار السائد، ونحن الآن على أعتاب الدخول إلى

مستوى التيرا إلكترون فولت من الطاقة، القادر على استكشاف المادة حتى مستويات تبلغ من الصِّغَر أقل من ١٠^{−١٨} أمتار؛ لذا حين نقول إن الإلكترونات والكواركات ليست لها بنية داخلية أعمق، فإننا يجب بالفعل أن نقول: «على الأقل حتى مستوى ١٠^{−١٨} أمتار.» من الممكن أن تكون هناك طبقات أعمق، على مسافات أصغر من تلك، لكنها تقع خارج نطاق قدرتنا الحالية على الاستكشاف في المختبرات؛ لذا رغم أنني سأتحدث في أنحاء هذا الكتاب كما لو أن هذه الكيانات هي المكونات الأصغر للمادة، ضع في اعتبارك على الدوام التحذير التالي: إننا نعلم فقط كيف تعمل الطبيعة على مسافات أكبر من ١٠^{−١٨} أمتار.

تعجيل الجسيمات

سنصف الأفكار المتعلقة بالمعجلات تفصيلًا في الفصل الخامس، لكن الآن دعونا نتفكر للحظة فيما تتطلبه هذه المعجلات. فلتعجيل الجسيمات إلى طاقاتٍ قَدْرها عدة عشرات أو مئات من الجيجا إلكترون فولت، سنكون بحاجة إلى مساحة كبيرة. كان في وسع تكنولوجيا منتصف القرن العشرين وأواخره تعجيل الإلكترونات — مثلًا — بمعدل يكتسب بموجبه كلُّ إلكترون داخلَ الحزمة عشراتِ من الميجا إلكترون فولت لكل متر يقطعه. وهكذا أنتج المعجل البالغ طوله ثلاثة كيلومترات، والموجود في مركز معجل ستانفورد الخطي بكاليفورنيا حِزَمًا من الإلكترونات تصل طاقتها إلى ٥٠ جيجا إلكترون فولت. وفي مختبر سيرن بجنيف، دُفِعت الإلكترونات إلى الدوران في دائرة طولها ٢٧ كيلومترًا، حتى وصلت إلى طاقة مقدارها ١٠٠ جيجا إلكترون فولت. أما البروتونات، نظرًا لضخامتها، فإنها تحقِّق مستويات أعلى من الطاقة، لكنها لا تزال بحاجة إلى معجلات ضخمة لتحقيق هذا الهدف. وفي النهاية، فإن العلاقة الكمية بين المسافات القصيرة، والأطوال الموجية القصيرة المطلوبة لاستكشاف هذه المسافات، والطاقات العالية للحِزَم هي التي تقف وراء هذا التناقض الظاهري المتمثِّل في ضرورة بناء آلات أضخم وأضخم لاستكشاف أدق المسافات.

كانت هذه هي المقاصد المبكرة لتلك التجارب الهادفة لسبر أغوار نواة الذرة عن طريق قصفها بحِزَم من الجسيمات العالية الطاقة. وطاقة الجسيمات الموجودة في هذه الحِزَم هائلة (على مقياس الطاقة المحتواة داخل نواة منفردة، والتي تُبقِي على تماسك النواة)، ونتيجة لذلك تنزع الحزم إلى تهشيم الذرة وجسيماتها إربًا، وهو ما ينتج عنه

إنتاج جسيمات جديدة خلال العملية. هذا هو السبب الكامن خلف التسمية القديمة «مهشمات الذرات»، لكننا اليوم نفعل ما هو أكثر من هذا؛ لذا لم يَعُدْ هذا الاسم صالحًا.

الإلكترون والبروتون

الجسيمات المشحونة كهربيًّا التي تتألف منها الذرات هي الإلكترونات والبروتونات، وتتكون ذرة أبسط العناصر — الهيدروجين — في المعتاد من إلكترون وحيد (سالب الشحنة)، وبروتون وحيد يحمل القدر عينه من الشحنة، لكنها شحنة موجبة. ومن ثَمَّ، رغم أن الذرة يمكن أن تكون متعادلة الشحنة الكهربية إجمالًا (كما الحال في أغلب صور المادة الكثيفة التي نألفها)، فإنها تحتوي على شحنات كهربية سالبة وأخرى موجبة داخلها، وهذه الشحنات، والقوى الكهربية والمغناطيسية التي تستشعرها، هي التي تُبقِي على الذرات داخل الجزيئات والمادة الكثيفة. سنتناول قوى الطبيعة الأساسية في الفصل السابع، لكننا سنركز هنا على هذه الجسيمات الأساسية ذات الشحنة الكهربية، وكيف جرى استخدامها كأدوات لاستكشاف البنى الذرية والنووية.

استُخدِمَت حِزَم الإلكترونات منذ القرن التاسع عشر، رغم أنه لم يعلم أحد وقتَها ماهيتَها؛ فحين مُرِّر التيار الكهربي عبر الغازات تحت ضغط منخفض للغاية، أمكن رؤية حزمة رفيعة كالقلم الرصاص. هذه الحزم كانت معروفة باسم «أشعة الكاثود»، ونعلم الآن أنها تتكون من إلكترونات. والمثال المألوف على هذه الأداة جهاز التليفزيون الحديث، حيث الكاثود هو السلك الساخن الموجود في الخلف، والذي تنبعث منه حِزَم الإلكترونات كي تظهر على الشاشة عندما ترتطم بها.

كانت مفاجأة عظيمة في القرن التاسع عشر حين اكتُشِف أن الأشعة يمكنها المرور عبر المادة الصلبة كما لو أن شيئًا لا يعترض طريقها. كان في هذا تناقض ظاهري؛ فالمادة الصلبة الملموسة صارت شفافة على المستوى الذري. وقد علَّق فيليب رينارد — الذي اكتشف هذا الأمر — قائلًا: «المساحة التي يشغلها متر مكعب من البلاتين الصلب خاوية، مثلها مثل الفضاء النجمي الموجود خارج الأرض.» قد تكون الذرات فضاءً خاويًا في معظمها، لكن هناك ما يمنحها كيانها، ويمنح الكتلة لكل الأشياء. وقد صار من الجلي أن هناك ما هو أكثر من الفضاء بفضل أعمال إرنست رذرفورد في السنوات الأولى من القرن العشرين، وقد تحقَّق هذا بعد اكتشاف الإلكترون والنشاط الإشعاعي، وقد وفَّرَ هذان الاكتشافان الأدوات الضرورية للكشف عن البنية الداخلية للذرة.

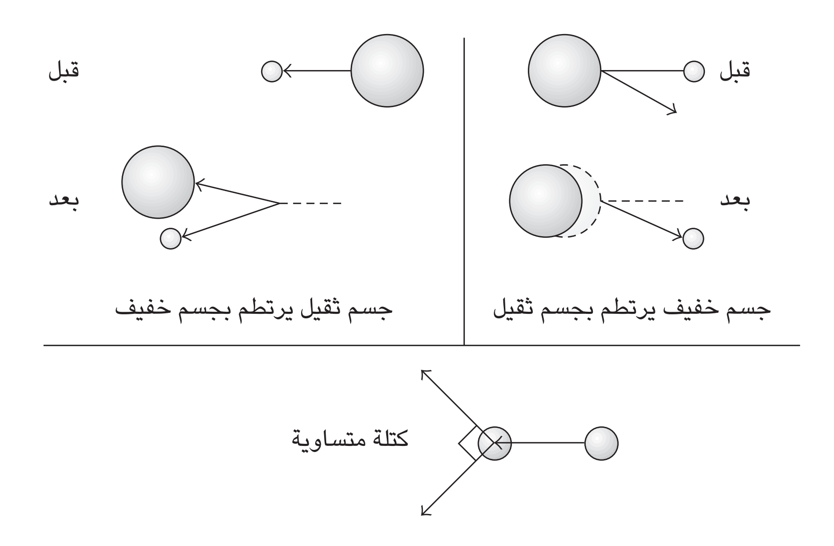
اكتُشِف الإلكترون وتحدد بوصفه مكونًا أساسيًّا للعناصر الذرية على يد جوزيف جون طومسون في عام ١٨٩٧. إن الإلكترونات، السالبة الشحنة الكهربية، موجودة داخل الذرة منذ أن تكوَّنَتِ الأرض، ومن السهل استخلاص الإلكترونات؛ إذ إن كل ما نحتاجه هو درجات حرارة قدرها بضعة آلاف درجة مئوية وحسب. ستعجل المجالات الكهربية الإلكترونات، وتمنحها طاقة، وبهذا تمكن حزم الإلكترونات العالية الطاقة من استكشاف البنى الصغيرة الحجم.

ليس الإلكترون هو الجسيم الذري الوحيد المستخدَم في هذا الغرض؛ فهناك البروتون الذي يحمل شحنةً كهربية موجبة تعادل شحنة الإلكترون السالبة، لكن كتلة البروتون أكبر على نحو واضح؛ إذ تبلغ نحو ألفَيْ مرة قدر كتلة الإلكترون. صارت البروتونات الخيارَ المفضَّل لعمليات الاستكشاف دون الذري، لكن في البدء كان هناك كيانٌ آخَر مشحون كهربيًّا أدَّى دورًا رئيسًا، ونعني بهذا جسيم ألفا.

نعلم في وقتنا الحالي أن جسيم ألفا ما هو إلا نواة ذرة الهليوم؛ تجمُّع مضغوط من بروتونين ونيوترونين، ومن ثَمَّ فهو موجب الشحنة وأثقل بنحو أربع مرات من ذرة الهيدروجين المنفردة. سبب أهمية هذا الجسيم يرجع إلى أن أنوية العديد من العناصر الثقيلة تطلق جسيمات ألفا تلقائيًّا، ومن ثَمَّ توفِّر مصدرًا مجانيًّا لهذه المستكشفات ذات الشحنة الكهربية. تتكون أنوية العناصر الثقيلة من عدد كبير من البروتونات والنيوترونات المحتشدة معًا على نحو محكَم، وتحدث ظاهرة نشاط ألفا الإشعاعي حين تسعى النواة الثقيلة لاكتساب الاستقرار بأن تُطلِق تلقائيًّا كُتَلًا صغيرة تتكون من بروتونين ونيوترونين. لا تهمنا تفاصيل هذه العملية هنا، لكن يكفينا القبول بأنها موجودة، وأن جسيم «ألفا» يظهر حاملًا طاقة حركة، ويمكنه اقتحام ذرات المواد المحيطة. وبهذه الطريقة تمكَّنَ إرنست رذرفورد ومساعداه جايجر ومارسدن من أن يكتشفوا لأول مرة وجود نواة الذرة.

حين قابلت جسيمات ألفا الذرات، تشتتت جسيمات ألفا بصورة عنيفة إلى حدٍّ ما، بل إنها في بعض الأحيان ارتدَّتْ عائدةً من حيث أتت. هذا هو ما يحدث حين تكون الشحنة الموجبة للعنصر الثقيل، الذهب مثلًا، متركزةً في كتلة مركزية مضغوطة. لقد صُدَّتْ جسيمات ألفا الموجبة الشحنة بواسطة نواة الذرة الموجبة الشحنة، وارتدت عنها مثلما يرتدُّ جسم خفيف، ككرة التنس، عند ارتطامه بجسم آخَر ثقيل، ككرة القدم.

جسيمات ألفا أخفُّ بكثير من أنوية الذهب، بَيْدَ أنها أثقل من البروتونات، التي يؤلِّف الواحد منها نواة ذرة الهيدروجين؛ لذا إذا وُجِّهت جسيمات ألفا صوب الهيدروجين،



شكل ٣-١: نتائج ارتطام الأجسام الثقيلة والخفيفة بالأجسام الخفيفة والثقيلة، على الترتيب.

فسيكون الموقف أشبه بما يحدث حين ترتطم كرة القدم الثقيلة بكرة التنس الخفيفة. في هذه الحالة ستميل كرة القدم إلى مواصلة طريقها، مطيحة بكرة التنس إلى الأمام في الاتجاه العام لحركتها نفسه؛ لذا حين ارتطمت جسيمات ألفا الثقيلة نسبيًّا ببروتونات الهيدروجين، اندفعت هذه البروتونات إلى الأمام. وقد تم الكشف عن هذا من خلال الآثار التي خلَّفتها في الغُرَف السحابية (انظر الفصل السادس).

بفضل هذه التجارب التي أُجرِيت في السنوات الأولى من القرن العشرين، ترسَّخت الفكرة الأساسية للذرة النووية. وإجمالًا نقول إن الطريقة التي تشتَّتت بها جسيمات ألفا عن الذرات ساعدت في ترسيخ صورة الذرة التي نعرفها منذئذٍ: تكمن الشحنة الموجبة داخل مركز مضغوط كثيف — نواة الذرة — بينما تطوف الإلكترونات السالبة الشحنة عن بُعْد في المحيط الخارجي للذرة.

لا تتسم جسيمات ألفا الموجودة على نحو طبيعي بالقوة الكبيرة، فهي تنطلق من الأنوية الثقيلة وهي تحمل بضعة من الميجا إلكترون فولت فقط من طاقة الحركة — أو ما يساوي ذلك من الزخم البالغ بضعة من الميجا إلكترون فولت مقسومة على سرعة

الضوء — ومن ثَمَّ فهي قادرة فقط على استكشاف البنى الواقعة في نطاق مسافات أكبر من $١٠^{-١٢}$ أمتار فقط. هذه الأحجام أصغر من أحجام الذرات، وبهذا تصير جسيمات ألفا مفيدة في استكشافها، لكنها لا تزال أصغر بكثير من نطاق الـ $١٠^{-١٤}$ أمتار الخاص بالنواة الكبيرة الحجم، كنواة الذهب، ناهيك عن نطاق الـ $١٠^{-١٥}$ أمتار الخاص بأحجام البروتونات والنيوترونات المنفردة التي تتحد كي تكون هذه الأنوية. لذا رغم أن جسيمات ألفا كانت ملائمة لاكتشاف وجود أنوية الذرات، فإن رؤية ما بداخل هذه الأنوية تطلبت حِزَم جسيمات ذات طاقة أكبر.

في ضوء هذا المقصد، صار لدينا بدايات فيزياء الجسيمات العالية الطاقة الحديثة. ففي عام ١٩٣٢ بُنِي أول معجل للجسيمات ذات الشحنة الكهربية على يد كلٍّ من كوكروفت ووالتون، وبدأت تتضح صورة تفصيلية لبنية النواة، وللجسيمات المكونة لها. يمكننا استخدام حِزَم الأنوية الذرية، لكن رغم أن هذه كانت في حقيقتها «مهشمات ذرات (أو بالأحرى أنوية)» وساعدت على تحديد نمط النظائر النووية (أشكال من العنصر نفسه تحتوي على العدد نفسه من البروتونات، لكن تحتوي على عدد متباين من النيوترونات) وتفاصيلها، فإن أوضح المعلومات عن المكونات النووية الأساسية جاءت باستخدام أبسط الحزم. تحتوي نواة الكربون في المعتاد على ستة بروتونات وعدد مماثل من النيوترونات؛ ومن ثَمَّ يتخلَّف قدر كبير من الحطام حين ترتطم نواة الكربون بنواة أخرى، وبعض هذا الحطام يأتي من نواة الكربون نفسها والبعض الآخَر من النواة الأخرى. وهذا يسبِّب صعوبةً بالغةً في تفسير النتائج. ومن الأبسط بكثير استخدام حزمة من البروتونات فقط، وهذا كان ويظل، أحد السبل الرئيسة لسبر أغوار النواة، والمسافات إلى نطاق $١٠^{-١٩}$ أمتار اليوم.

ظلت البروتونات، الموجبة الشحنة، هي المفضلة لما يزيد على الخمسين عامًا؛ وذلك لأنها تضرب بقوة كبيرة. ومع ذلك، للإلكترونات مزايا خاصة، وأغلب معارفنا الحالية حول بنية نواة الذرة — بل حتى معارفنا بشأن البروتونات والنيوترونات المكونة للنواة — ناتجة عن التجارب التي تستخدم حزم الإلكترونات.

يسبِّب النشاط الإشعاعي على صورة تحلل بيتا — إشعاع «بيتا» — انبعاثَ الإلكترونات، ويمكن استخدام هذه الإلكترونات لسبر أغوار بنية الذرة، إلا أن هذه الإلكترونات لها طاقات قدرها بضعة من الميجا إلكترون فولت وحسب، كما الحال في جسيمات ألفا، ومن ثَمَّ فهي تعاني من القصور عينه؛ إذ إنها تمكِّننا من رؤية النواة

مثلما تمكِّننا جسيمات ألفا، لكن دون القدرة على استكشاف البنية الداخلية للنواة. كان مفتاح التقدُّم هو تأيين الذرات، وتحرير واحد أو أكثر من إلكتروناتها، ثم تعجيل حركة حزمة الإلكترونات المتراكمة بواسطة مجالات كهربية. وبحلول منتصف خمسينيات القرن العشرين في ستانفورد بكاليفورنيا، بدأت حِزَمٌ ذات طاقات قدرها ١٠٠ ميجا إلكترون فولت إلى ١ جيجا إلكترون فولت في استكشاف مسافات تقترب من ١٠$^{-١٥}$ أمتار. بدأت الإلكترونات المرتدة عن البروتونات والنيوترونات في الكشف عن أدلة على وجود طبقة أعمق من البنية داخل هذه الجسيمات النووية. بيَّنَتْ هذه التجارب أن النيوترون، رغم أنه متعادِل كهربيًّا إجمالًا، له تأثيرات مغناطيسية وغيرها من الخواص التي توحي بأن هناك شحنتين كهربيتين داخله؛ شحنة موجبة وأخرى سالبة متعادلتين بصورة ما، مثلما هو الحال داخل الذرة. وجد أيضًا أن البروتونات لها حجم محدَّد، يمتد عبر مسافة في نطاق ١٠$^{-١٥}$ أمتار. وما إن تأكَّدَ أن البروتونات ليست جسيمات نقطية، تبادَرَ السؤال بشأن كيفية توزيع الشحنة داخل البروتون. تذكِّرنا هذه التساؤلات بما كان عليه الحال منذ سنوات في حالة الذرة، وقد جاءت إجاباتها بطُرُق مشابهة. في حالة الذرة، تم الكشف عن نواتها المركزية الصلبة بواسطة تشتُّت جسيمات ألفا، وفي حالة البروتونات، كان من شأن حِزَم الإلكترونات العالية الطاقة أن تمنحنا الجواب.

عام ١٩٦٨ مكَّنَنَا المعجل الخطي البالغ طوله ثلاثة كيلومترات في ستانفورد، من إلقاء أول نظرة واضحة داخل نواة الذرة، واكتشاف أن ما نعرفه باسم البروتونات والنيوترونات ما هو إلا كرات من «الكواركات» المحتشدة.

في طاقات أعلى من ١٠ جيجا إلكترون فولت، تستطيع الإلكترونات استكشافَ مسافات قدرها ١٠$^{-١٦}$ أمتار؛ أي أصغر عشر مرات من البروتون ككل. حين قابلت الإلكترونات البروتون، وُجِد أنها تتشتَّت بعنف. يشبه هذا ما حدث منذ نحو ٥٠ عامًا مع الذرة؛ فبينما كشف التشتُّت العنيف لجسيمات ألفا المنخفضة الطاقة نسبيًّا عن أن للذرة قلبًا صلبًا مشحونًا؛ نواتها، بَيَّن التشتُّت العنيف غير المتوقع للإلكترونات العالية الطاقة أن شحنة البروتون مركَّزة في أجسام «نقطية»، أو الكواركات (نعني بكلمة «نقطية» في هذا السياق أننا نعجز عن تبين ما إذا كان لها أي بنية داخلية خاصة بها من عدمه). ووفق أفضل التجارب التي يمكننا القيام بها اليوم، تبدو الإلكترونات والكواركات بمنزلة المكونات الأساسية للمادة الكثيفة إجمالًا.

الفصل الرابع

قلب المادة

يستعرض هذا الفصل الكواركات العلوية والسفلية، والإلكترونات، والنيوترينو الشبحي، والدور الذي تلعبه هذه الجسيمات، وكيف أن كتلتها وغيرها من السمات الأخرى الخاصة بها ذات أهمية محورية للحياة، والكون، لكن ليس لكل شيء. كما يستعرض الفصل الأشعة الكونية والأدلة على وجود أشكال غير أرضية من المادة لا توجد على نحو طبيعي على الأرض، كما يستعرض النيوترينوات من حيث إنتاجها داخل الشمس والنجوم، وعلم فلك النيوترينوات.

* * *

وصفنا كيف تحقَّقَ اكتشافُ البنية الذرية واكتشاف البروتون منذ قرن مضى نتيجة تشتُّت حزم الجسيمات العالية الطاقة المصطدمة بها. ومع ذلك، في حالة كلٍّ من الذرة والبروتون، جاءت أولى الدلائل على وجود بنية داخلية في وقت مبكر عن ذلك، من اكتشاف الأطياف.

كانت أولى الدلائل على وجود الإلكترونات داخل الذرة هي اكتشاف أن العناصر الذرية تبعث الضوء بأطوال موجية متمايزة تتجسد — على سبيل المثال — على صورة ألوان متباينة بدلًا من المدى الكامل لألوان قوس قزح، وهو ما يُطلَق عليه الخطوط الطيفية. نعرف في وقتنا الحالي أن ميكانيكا الكم تقصر حالات حركة الإلكترونات داخل الذرات في مجموعة منفصلة، وكل حالة لها مقدار محدَّد من شدة الطاقة. حين تكون الذرة في أدنى طاقة إجمالية لها يُعرَف هذا الوضع باسم «الحالة القاعية»، بينما جميع الأوضاع الأخرى تكون مستويات الطاقة فيها أكبر وتُعرَف باسم «حالات الإثارة». تنتج الأطياف الذرية عن إشعاع الضوء أو امتصاصه عندما تقفز إلكترونات هذه الذرات

بين حالات الإثارة المختلفة، أو بين حالة الإثارة والحالة القاعية. تظل الطاقة الإجمالية محفوظة، والفارق في الطاقة بين الحالتين الذريتين يساوي طاقة الفوتون الذي جرى إطلاقه أو امتصاصه خلال العملية. وقد كشفت أطياف هذه الفوتونات عن الفوارق بين مستويات الطاقة هذه للذرة، ومن هذه المجموعة الثرية من البيانات أمكن استنتاج صورة لمستويات الطاقة. وهكذا فسَّرَ تطوُّر ميكانيكا الكم كيفية ظهور أنماط مستويات الطاقة: فهي تتحدَّد وفق طبيعة القوى الكهربية والمغناطيسية التي تربط الإلكترون بالنواة المركزية؛ وتحديدًا في حالة أبسط الذرات — الهيدروجين — ترتبط عن كثب بحقيقة أن شدة القوة الكهربية بين الإلكترون والبروتون تتناقص بالتناسب مع مربع المسافة بينهما.

وقعت مجموعة مشابهة من الظروف في حالة البروتون؛ فحين أُجرِيت أولى تجارب «مهشمات الذرات» في خمسينيات القرن العشرين وستينياته، اكتُشِفت العديد من الجسيمات المشابهة للبروتون لكنها أثقل وقصيرة العمر، وتُعرَف باسم «التجاوبات» أو الرنين. ظهر نطاق كامل من الحالات، وبالنظر للأمر من منظورنا الحالي يبدو من البديهي وجود أدلة على أن البروتون والنيوترون نظمًا تتألف — كما نعرف الآن — من الكواركات، إلا أن الأمر لم يكن بمثل هذا الوضوح وقتها. إن حركة هذه الكواركات هي التي تمنح البروتونات والنيوترونات أحجامها، تمامًا مثلما تحدِّد حركة الإلكترونات حجم الذرات. أيضًا الكواركات هي التي تزوِّد البروتونات والنيوترونات بشحناتها الكهربية وخواصها المغناطيسية. ورغم أن الشحنات الكهربية للكواركات التي تؤلِّف النيوترونات يكون مجموعها في النهاية صفرًا، إلا أن مغناطيسيتها المنفردة لا تتلاشى، وهو ما يؤدي إلى وجود العزم المغناطيسي للنيوترون. فقط حين تكون الكواركات في الحالة الأدنى من الطاقة ينشأ الترتيب الذي نسميه البروتون أو النيوترون، أما لو جرى استثارة كوارك واحد أو أكثر إلى مستوى أعلى من الطاقة داخل نطاق الجهد الكهربي الذي يربط بينها، فسيتكون أحد التجاوبات القصيرة العمر ذو طاقة الوضع — أو الكتلة — الأكبر بالتكافؤ مع مقدار الاستثارة. وهكذا تكون الدراسة الطيفية لحالات التجاوبات القصيرة العمر ناتجة عن استثارة الكواركات المؤلفة للبروتونات.

إلى هنا والأمر يشبه ما حدث مع الذرة، بَيْدَ أن هناك اختلافات مهمة؛ فحين تُزوَّد الإلكترونات بالمزيد والمزيد من الطاقة، فإنها ترتفع إلى مستويات أعلى من الطاقة، وفي نهاية المطاف تندفع خارجةً من الذرة، وفي هذا السيناريو نقول إن الذرة «مؤينة». في

الفصل الثاني رأينا كيف أن درجة حرارة قدرها $١٠^{٤}$ درجات كلفينية توفِّر الطاقة الكافية لتأيين الذرات، كما الحال داخل الشمس. في حالة البروتون، حين يُقصَف بطاقات عالية، ترتفع كواركاته إلى مستويات أعلى، وتُرَى التجاوبات القصيرة العمر. هذه الطاقة تنطلق بسرعة، من خلال انبعاث فوتونات أو جسيمات أخرى — كما سنرى — وتتحلل حالة التجاوب ويعود البروتون أو النيوترون مجدَّدًا إلى حالته الأصلية. لم يسبق أن نجح أحد في تأيين بروتون وحرَّر أحد الكواركات المكوِّنة له على نحو منفصل؛ إذ تبدو الكواركات كما لو أنها محتواة على نحو دائم في مساحة قدرها $١٠^{-١٥}$ أمتار؛ أي «حجم» البروتون. خلا ذلك، وهو ما ينتج عن طبيعة القوى بين الكواركات، تتشابه القصة نوعيًّا مع قصة الإلكترونات داخل الذرة. فالمستويات المستثارة قصيرة العمر، وتطلق طاقة زائدة، عادةً على صورة فوتونات أشعة جاما، ثم تعود مجدَّدًا إلى الحالة القاعية (بروتون أو نيوترون). وعلى نحو معاكس، يمكننا استثارة إحدى حالات التجاوب هذه من خلال تشتيت الإلكترونات من البروتونات أو النيوترونات.

آخِر أجزاء التشبيه جاءتنا عام ١٩٧٠. فقد تشتتت حِزَم الإلكترونات — التي تم تعجيلها وصولًا إلى طاقات مقدارها ٢٠ جيجا إلكترون فولت — بعد اصطدامها بالبروتونات في ستانفورد بكاليفورنيا. وعلى نحو مشابه لما حدث مع رذرفورد منذ نصف قرن، لوحظ أن الإلكترونات تتشتت عبر زوايا كبيرة. وهذه نتيجة مباشِرة لاصطدام الإلكترونات بالكواركات، الجسيمات الأساسية شبه النقطية التي تتألف منها البروتونات.

خلال الثلاثين عامًا التالية جرى التوسُّع في هذه التجارب إلى طاقات أعلى، وأحدثها ما تم في معجل الهادرونات والإلكترونات (هيرا) في هامبورج بألمانيا. وقد منحتنا صور البروتونات العالية الدقة الناتجة فِكَرًا أساسية بشأن طبيعة القوى التي تربط بين الكواركات بعضها ببعض، وقد أدى هذا إلى ظهور نظرية للكواركات تُعرَف باسم نظرية الديناميكا اللونية الكهربية، وسنعرف عنها المزيد في الفصل السابع. وقد نجحت قدرة هذه النظرية على وصف تفاعلات الكواركات والجلوونات على مسافات تقل عن $١٠^{-١٦}$ أمتار في اجتياز كل اختبار تجريبي.

كواركات ذات نكهات

يكفي تجمُّع ثلاثة كواركات معًا لتكوين البروتون أو النيوترون، وهناك نوعان مختلفان (أو «نكهتان») للكواركات مطلوبان من أجل تكوين البروتون أو النيوترون؛ وهما يُعرَفان بالكواركات العلوية والسفلية (وعادةً ما يشار لهما بالاختصارين u وd على الترتيب). ويتكون البروتون من كواركين علويين وثالث سفلي، فيما يتكون النيوترون من كواركين سفليين وثالث علوي.

للكواركات شحنات كهربية. ويحمل الكوارك العلوي شحنة مقدارها ٢ / ٣ من الشحنة (الموجبة) للبروتون، فيما يحمل الكوارك السفلي شحنة قدرها −١ / ٣ (أي شحنة سالبة). ومن ثَمَّ فإن الشحنة الكهربية الإجمالية للبروتون أو النيوترون هي مجموع الشحنات المنفردة للكواركات، وهكذا فإن البروتون (كواركان علويان وكوارك سفلي) يساوي ٢ / ٣ + ٢ / ٣ − ١ / ٣ = +١، أما النيوترون (كواركان سفليان وكوارك علوي) فيساوي −١ / ٣ − ١ / ٣ + ٢ / ٣ = ٠.

جدول ٤-١: خصائص الكواركات العلوية والسفلية.

الكوارك	علوي	سفلي
الشحنة	+٢ / ٣	−١ / ٣
ك × س٢ (ميجا إلكترون فولت)	≃ ٤	≃ ٥
اللف المغزلي	١ / ٢	١ / ٢

للجسيمات زخم زاوي ذاتي، ويُطلَق عليه اسم «اللف المغزلي»، ويقاس مقدار اللف المغزلي بوحدات ثابت بلانك، h، مقسومة على 2π، ومتى استخدمت هذه الصيغة في عموم الفيزياء الذرية وفيزياء الجسيمات، يشار إليها بالرمز $\hbar$. ويملك كلٌّ من البروتونات والنيوترونات والكواركات من اللف المغزلي المقدار $\hbar/2$، أو اختصارًا «لف مغزلي قدره ١ / ٢».

يمكن جمع اللف المغزلي أو طرحه ما دام الناتج ليس سالبًا؛ لذا الجمع بين جسيمين لكلٍّ منهما لف مغزلي قدره ١ / ٢ ينتج عنه إما صفر أو ١، بينما الجمع بين ثلاثة كواركات ينتج عنه إما ١ / ٢ أو ٣ / ٢. للبروتون والنيوترون لف مغزلي قدره ١ / ٢، وهو

ناتج عن اتحاد اللف المغزلي لثلاثة كواركات وفق الصيغة السالف ذكرها. وحين تتحد الكواركات بإجمالي لف مغزلي قدره ٣ / ٢، تكون طاقتها الإجمالية أكبر بنحو طفيف، وهذا ينتج عنه تكوُّن الجسيمات القصيرة العمر المعروفة باسم «التجاوبات Δ»، والتي تملك نحو ٣٠٪ إضافية من الكتلة مقارَنَةً بالبروتون أو النيوترون، وهي تعيش لأقل من $١٠^{-٢٣}$ ثوانٍ قبل أن تتحلل ثانية إلى البروتونات والنيوترونات الأكثر استقرارًا. ($١٠^{-٢٣}$ ثوانٍ هو وقت قصير لدرجة يستحيل تصوُّرها، لكنه تقريبًا الوقت الذي يستغرقه الضوء في اجتياز نواة ذرة وحيدة.) تسمح قواعد ميكانيكا الكم (مبدأ الاستبعاد لباولي) فقط لارتباطات معينة أن تحدث بين مقادير اللف المغزلي ونكهات الكواركات، وهذا هو ما يمنع ثلاثة كواركات علوية أو سفلية «متطابقة» من الاتحاد بحيث يكون صافي لفها المغزلي ١ / ٢، ومن ثَمَّ لا يوجد أشقاء للبروتون والنيوترون بشحنة قدرها +٢ أو −١ مكوَّنَة على الترتيب من ثلاثة كواركات علوية أو ثلاثة كواركات سفلية. على النقيض، حين تتحد ثلاثة كواركات بلف مغزلي قدره ٣ / ٢، يُسمَح لثلاث «نكهات» متطابقة من الكواركات بالاتحاد معًا؛ ومن هنا توجد أمثلة على اتحاد ثلاثة كواركات علوية Δ^{++}، وثلاثة كواركات سفلية Δ^{-} (يشير الرمزان العلويان إلى شحنتيهما الكهربية). التفاصيل الكاملة للكيفية التي تظهر بها هذه الارتباطات تتضمن خواصَّ للكواركات تحكم القوى الشديدة التي تربط بين الكواركات (انظر الفصل السابع)، بَيْدَ أنها تخرج عن نطاق هذه المقدمة الوجيزة.

تبلغ كتلة الكواركات المنفردة نحو عشرة أضعاف كتلة الإلكترون. وبما أن البروتون والنيوترون لهما كتلة متشابهة — تبلغ نحو ألفي مرة قدر كتلة الإلكترون — ثمة سؤالان علينا الإجابة عنهما؛ الأول: كيف يحصل البروتون والنيوترون على هذه الكتلة الضخمة؟ والثاني: هل كتل هذه الكواركات، التي يمكن اعتبارها مماثلة لكتلة الإلكترون، تشير إلى وجود نوع من الوحدة العميقة بين المكونات الأساسية للمادة؟

تتحد الكواركات بعضها ببعض بإحكام، وتبقى على الدوام في مجموعات ثلاثية كتلك التي تكون الجسيم الذي نسميه البروتون. لم يحدث قطُّ أن عُزِل أحد الكواركات عن رفاقه، وعالم الكواركات يمتد فقط لمسافة $١٠^{-١٥}$ أمتار التي هي مساحة حجم البروتون، وهذا الاحتجاز داخل «الفمتو كَوْن» البالغ حجمه $١٠^{-١٥}$ أمتار والذي نسميه البروتون، هو ما يمنح الكواركات طاقتها الإجمالية البالغة نحو ٩٣٨ ميجا إلكترون فولت، والتي هي كتلة البروتون. رأينا كيف أن ثمة علاقة بين الأطوال والطاقة، وأن

الكوارك الواحد يمكن أن يشير محور اللف المغزلي الخاص به إلى أعلى أو أسفل $q\uparrow$ أو $q\downarrow$.

الكواركان يكون صافي اللف المغزلي الخاص بهما إما ١ $\uparrow\uparrow$ أو ٠ $\uparrow\downarrow$.

الثلاثة كواركات يكون صافي اللف المغزلي لها إما ٣/٢ $\uparrow\uparrow\uparrow$ أو ١/٢ $\uparrow\downarrow\uparrow$.

أمثلة:

$$\binom{uud}{\uparrow\uparrow\downarrow} = \Delta^{+} \quad \binom{uuu}{\uparrow\uparrow\uparrow} = \Delta^{++}$$ مع لف مغزلي قدره ٣/٢.

$$\binom{udu}{\uparrow\downarrow\uparrow}$$ أو $$\binom{uud}{\uparrow\uparrow\downarrow}$$ مع لف مغزلي قدره ١/٢ = البروتون.

شكل ٤-١: اللف المغزلي للكواركات وكيف تتحد.

المسافات في نطاق $١٠^{-١٥}$ أمتار تكافئها طاقة قدرها نحو ١ جيجا إلكترون فولت. علاقة التكافؤ الفعلية ذات الصلة هنا تتضمن عوامل قدرها ٢ وπ، وهو ما يخرج بنا عن نطاق هذه المقدمة الوجيزة، لكن النتيجة هي أن الكوارك العلوي أو السفلي — الذي إن تُرِك وحيدًا ستكون طاقته بضعة ميجا إلكترون فولت — حين ينحصر داخل الفمتو كَوْن البالغ حجمه $١٠^{-١٥}$ أمتار ستكون طاقته نحو ٢٠٠ إلى ٣٠٠ ميجا إلكترون فولت. إن الكواركات تتفاعل بقوة مع بعضها (ويجب أن يكون الأمر كذلك لأنه لا مهرب لها!) والتفاصيل الكاملة للكيفية التي صارت بها كتلة البروتون ٩٣٨,٤ ميجا إلكترون فولت تحديدًا تقع خارج نطاق أي نظرية نملكها في الوقت الحالي.

الكوارك السفلي أكبر من الكوارك العلوي بنحو بضعة ميجا إلكترون فولت. لا نعلم سبب هذا (في الواقع، لا نعلم السبب وراء امتلاك هذه الجسيمات الأساسية، بما فيها الإلكترونات، لمقادير الكتل التي تملكها)، لكن هذا يفسِّر سبب كون النيوترون أكبر قليلًا من البروتون. إن التجمُّع الثلاثي لكواركين علويين وكوارك سفلي (البروتون)، والتجمع الثلاثي لكواركين سفليين وكوارك علوي (النيوترون)، سيكون له كتلة قدرها نحو ١ جيجا إلكترون فولت، وذلك بفضل انحباس الكواركات داخل منطقة مساحتها $١٠^{-١٥}$ أمتار. ستكون هناك اختلافات في نطاق ١ ميجا إلكترون فولت نتيجة لخاصيتين: (١) أن النيوترون به كوارك سفلي إضافي على حساب كوارك علوي مقارَنَةً بالبروتون،

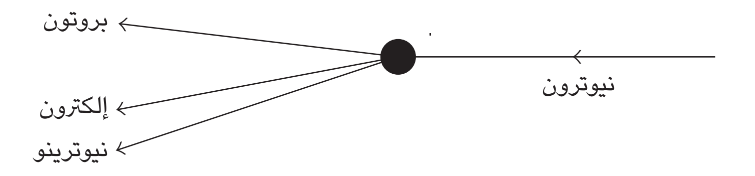
والكتلة الأكبر بهذا الكوارك السفلي تمنح النيوترون إجمالًا كتلةً أكبر من الثلاثي المكافئ المكون للبروتون. (٢) القوى الكهروستاتيكية بين كواركين علويين وكوارك سفلي (كما في البروتون) ستختلف عن تلك الموجودة بين كواركين سفليين وكوارك علوي (كما في النيوترون). هذه الاختلافات أيضًا تسهم في الطاقة الإجمالية في نطاق الميجا إلكترون فولت؛ وبهذا يكون فارق الكتلة بين النيوترون والبروتون (١٫٣ ميجا إلكترون فولت من واقع التجارب) راجعًا إلى القوى الكهروستاتيكية بين الكواركات المكونة لكلٍّ منهما، والكتلة الذاتية الأكبر للكوارك السفلي مقارنة بنظيره العلوي.

الكواركين العلوي والسفلي أشقاء في عائلة الكواركات، لكن الإلكترون لا يتكوَّن من كواركات، وفي حدود علمنا هو جسيم أساسي شأنه شأن الكوارك، وبهذا ينتمي الإلكترون إلى عائلة مختلفة، تُعرَف باللبتونات. ومثلما يتجمع الكواركان العلوي والسفلي معًا، بفارق قدره وحدة واحدة بين شحنتيهما الكهربيتين (بمعنى أن +٢ / ٣ − (−١ / ٣) = ١)، فالإلكترون أيضًا له شقيق تختلف شحنته الكهربية عن شحنة الإلكترون بمقدار وحدة واحدة فقط. هذا الجسيم، عديم الشحنة الكهربية، يُعرَف باسم «النيوترينو».

تُنتَج النيوترينوات في عمليات التحلُّل الإشعاعي للعديد من الأنوية الذرية. ففي هذه العمليات، تظهر النيوترينوات إلى جانب أشقائها الإلكترونات. على سبيل المثال، ما دام النيوترون ليس حبيسًا داخل نواة، فإنه يتحوَّل إلى بروتون من خلال إطلاق إلكترون ونيوترينو خلال هذه العملية. يُطلَق على هذا اسم تحلُّل بيتا، حيث ينتج عدم استقرار النيوترون عن امتلاكه كتلة أكبر قليلًا من كتلة البروتون. تسعى الطبيعة للوصول إلى حالات الطاقة الأدنى، وهو ما يُترجَم في هذه الحالة إلى حالة الكتلة الأدنى. إن مقدار الكتلة الزائد الذي يملكه النيوترون هو الذي يجعله غير مستقر (قليلًا) حين يُترَك منفردًا. وإذا امتلكت مجموعة كبيرة من النيوترونات، كلٌّ منها حرٌّ عن الآخَرين، فبعد حوالي عشر دقائق سيتحلل نصفها بفعل نشاط بيتا الإشعاعي. وإذا أشرنا إلى النيوترون والبروتون بالرمزين n وp على الترتيب، وإلى الإلكترون والنيوترينو بالرمزين e^- وν، يمكن تلخيص تحلُّل بيتا للنيوترون بالمعادلة التالية:

$$n \longrightarrow p + e^- + \nu$$

ليس للنيوترون شحنة كهربية إجمالًا، ويظل الوضع كذلك في تحلُّل بيتا؛ إذ يملك البروتون وحدة واحدة موجبة، تعادِل شحنة الإلكترون السالبة. والبروتون، الذي هو



شكل ٤-٢: تحلُّل بيتا للنيوترون.

أخفُّ حالة مكونة من ثلاثة كواركات، يتسم بالاستقرار (أو على الأقل إذا كانت البروتونات غير مستقرة، فإن متوسط أعمارها أكبر من ١٠^٣٢ أعوام!)

النيوترينو

إضافة إلى عدم امتلاكه شحنة كهربية، لا يملك النيوترينو أي كتلة، وهو يخترق كل شيء تقريبًا. فالنيوترينوات، التي لا تتأثر بأيٍّ من القوى العاملة داخل المادة الكثيفة، يصعب للغاية كشفها، وهي فعليًّا أكثر الجسيمات انعدامًا للتأثير قاطبة.

النيوترينو هو أول «حفرية» متخلفة عن الانفجار العظيم، وهو رسول آتٍ من أولى العمليات التي جرت في الكون. تحدِّد النيوترينوات مدى السرعة التي يتمدَّد بها الكون، وقد تحدِّد أيضًا مصيره النهائي. في النجوم كالشمس، تلعب النيوترينوات دورًا أساسيًّا في تكوين العناصر الثقيلة الضرورية للحياة. تحصل الشمس على طاقتها عن طريق اندماج البروتونات المتلاطمة قرب مركزها، بحيث تتَّحد مكوِّنة أنوية الهليوم، وخلال هذه العملية تتحول بعض البروتونات إلى نيوترونات بواسطة أحد أنواع نشاط بيتا الإشعاعي، وتنبعث النيوترينوات خلال هذه العملية. والتأثير هائل: فالنيوترينوات تُنتَج داخل الشمس بمعدل قدره ٢ × ١٠^٣٨ كل ثانية؛ هذا يعني الرقم اثنين متبوعًا بثمانية وثلاثين صفرًا، وليس بإمكاني حتى أن أتخيَّل كيف أمنحك فكرةً عن مدى ضخامة هذا الرقم، فهو أشبه في ضخامته بحجم الكون الإجمالي مقارنةً بحجم ذرة وحيدة. هذه النيوترينوات تندفع إلى الفضاء والعديد منها يضرب الأرض، وخلال كل ثانية تمر تخترق أجسادنا جميعًا نحو ٤٠٠ مليار من النيوترينوات الآتية من الشمس.

أيضًا يتسبَّب النشاط الإشعاعي الطبيعي للعناصر على الأرض، على غرار اليورانيوم، في تحرير النيوترينوات؛ إذ يضربنا منها نحو ٥٠ مليار جسيم كل ثانية، وهكذا تنتج الشمس مقدارًا عظيمًا من النيوترينوات؛ إذ يصلنا منها كل ثانية بعد الانتشار عبر مسافة قدرها ١٠٠ مليون كيلومتر نحو ثمانية أضعاف المقدار الذي يأتينا من تحت أقدامنا هنا على الأرض. نحن أيضًا نشارك في النشاط الإشعاعي (بصفة أساسية من خلال عمليات تحلُّل البوتاسيوم في عظامنا) ونطلق نحو ٤٠٠ نيوترينو كل ثانية.

إجمالًا، النيوترينوات هي أكثر الجسيمات شيوعًا على الإطلاق، بل إن ما يطير منها في أرجاء الكون يزيد في عدده عن الفوتونات؛ الجسيمات الأساسية للضوء.

وهي أيضًا شائعة لدرجة أن كتلتها يمكنها التأثير على جاذبية الكون. لو أن للنيوترينوات كتلة، فهي ضئيلة للغاية لدرجة أنه لم يستطع أحد إلى اليوم قياسها، لكن هناك سُبُلًا آخذة في الظهور توحي بإمكانية عمل ذلك (موصوفة في الفصل العاشر).

النيوترينوات الآتية من الشمس تخترق المادة دون ممانعة تقريبًا، ولهذا يخترق منها أسرَّتنا في الليل عددٌ مماثلٌ لما يخترق أجسامنا في ضوء النهار. وبمقدور النيوترينو أن يخترق مسافةً قدرها سنة ضوئية من مادة الرصاص دون أن يرتطم بشيء. هذه الخاصية للنيوترينوات عادةً ما تُذكَر في المقالات العامة، وهذا يجعل السؤال البديهي التالي يقفز إلى عقولنا: كيف نتمكن من الكشف عنها؟ والجواب هو أن ثمة شيئين يساعداننا في هذه المهمة.

الشيء الأول هو استخدام مصادر ضخمة للغاية للنيوترينوات بحيث تعمل الصدفة مفعولها ويرتطم نيوترينو أو اثنان بالذرات الموجودة في الكاشف ويتم تسجيلهما. فرغم أن النيوترينو الوحيد قد يتفاعل مع المادة مرة واحدة كل وقت طويل (أو كل سنة ضوئية)، فإن الشمس تنتج من النيوترينوات عددًا ضخمًا يجعل عامل الصدفة يعمل في صالحنا. قد لا أملك أنا أو تملك أنت فرصة الفوز في اليانصيب، لكن إذا شارَكَ في السَّحْب عددٌ كبير من الأفراد فسيكون الحظ حليف أحدهم. وفي وجود عدد كبير من النيوترينوات مسلَّط علينا، سيرتطم بعضها بالذرات في طريقه. وهكذا باستخدام وعاء كبير بما يكفي من المادة — من الماء أو الحديد أو حتى سوائل التنظيف (الكلور على الأخص مفيد في الكشف عن النيوترينوات) — أمكن الكشف عن بعض النيوترينوات العرضية الآتية من الشمس. وثمة علم جديد يُسمَّى علم فلك النيوترينوات آخِذ حاليًّا في البزوغ. وقد كشف هذا العلم بالفعل عن أن النيوترينوات الفعلية الآتية من الشمس

عددها أقل مما قد يقودنا فهمنا للشمس إلى توقُّعه، إلا أن الشمس ليست هي المشكلة؛ إذ يبدو أن شيئًا ما يحدث للنيوترينوات وهي في الطريق، وسنستعرض هذا في الفصل العاشر.

الخاصية الثانية التي تساعدنا هي أن النيوترينوات «خجولة» على مستوى الطاقات المنخفضة فقط، كتلك التي تطلقها الشمس. وعلى النقيض، النيوترينوات ذات الطاقة العالية (كالتي تُنتَج في بعض العمليات الكونية أو في معجلات الجسيمات العالية الطاقة) لها ميل أكبر بكثير للكشف عن نفسها؛ وهكذا تمكَّنَّا داخل المعجلات عالية الطاقة من إنتاج النيوترينوات ودراستها تفصيليًّا. وهنا أيضًا حصلنا على أول التلميحات على أن للنيوترينوات كتلة صغيرة غير صفرية، وقد يجعلنا هذا نعيد التفكير في أفكارنا الخاصة بعلم الكونيات.

الجسيمات المضادة

الكواركات والإلكترونات هي البذور الأساسية للذرات، وللمادة كما نعرفها. لكن ليست هذه القصة كلها؛ إذ توجد أيضًا صورة معكوسة من الجسيمات تُعرَف بالجسيمات المضادة، التي هي أصل المادة المضادة. لكل نوع من الجسيمات جسيم «مضاد» خاص به: جسيم له نفس الكتلة واللف المغزلي والحجم ومقدار الشحنة الكهربية التي يحملها الجسيم الأصلي، لكن الشحنة الكهربية تكون معكوسة. وهكذا، على سبيل المثال، نجد أن للإلكترون السالب الشحنة إلكترونًا مضادًّا موجبَ الشحنة، يُعرَف باسم «البوزيترون»، والذي يجب عدم الخلط بينه وبين البروتون؛ فالبروتون أثقل بنحو ألفي مرة من البوزيترون، وله جسيم مضاد خاص به — البروتون المضاد — الذي يحمل شحنة سالبة. والقوى التي تمكِّن الإلكترون والبروتون من الاتحاد لتكوين ذرة الهيدروجين هي التي تمكِّن أيضًا البوزيترون والبروتون المضاد من تكوين ذرة الهيدروجين المضادة.

يمكننا تلخيص شحنات الجسيمات الأساسية والجسيمات المضادة التي قابلناها إلى الآن في الجدول رقم ٤-٢.

بما أن البروتون يتكوَّن من كواركين علويين وكوارك سفلي، uud، يتكوَّن البروتون المضاد من كواركين علويين مضادين وكوارك سفلي مضاد، $\overline{u}\,\overline{u}\,\overline{d}$. ومن المعتاد الإشارة إلى الجسيم المضاد بنفس رمز الجسيم الأصلي، لكن مع وضع شرطة فوقه. هذا هو الحال ما لم تكن شحنة الجسيم المضاد محدَّدة، وفي هذه الحالة يأخذ الجسيم المضاد علامة

جدول ٤-٢: الجسيمات الأساسية للمادة والجسيمات المضادة.

الجسيم	الشحنة	الجسيم المضاد	الشحنة
الإلكترون e^-	−١	البوزيترون e^+	+١
النيوترينو ν	٠	النيوترينو المضاد $\overline{\nu}$	٠
الكوارك العلوي u	+٢ / ٣	الكوارك العلوي المضاد $\overline{u}$	−٢ / ٣
الكوارك السفلي d	−١ / ٣	الكوارك السفلي المضاد $\overline{d}$	+١ / ٣

الشحنة الكهربية المعاكسة (كما في حالة البوزيترون، الذي يشار له بالرمز e^+ لأسباب تاريخية). وعلى نحو مشابه، بالنسبة إلى النيوترون الذي يتكوَّن من كواركين سفليين وكوارك علوي، ddu، يتكوَّن النيوترون المضاد من كواركين سفليين مضادين وكوارك علوي مضاد $\overline{d}\,\overline{d}\,\overline{u}$. وهكذا رغم أن النيوترون والنيوترون المضاد لهما الشحنة عينها، فإن بنيتهما الداخلية هي التي تميِّز بينهما. أيضًا النيوترينو والنيوترينو المضاد لهما الشحنة عينها، لكن الخاصية الفارقة بينهما أكثر تعقيدًا؛ فحين تتفاعل النيوترينوات مع أحد جسيمات المادة — نيوترون مثلًا — فإنها تتحول إلى إلكترونات ويتحوَّل النيوترون إلى بروتون، وهكذا يتم الحفاظ على الشحنة الكهربية الإجمالية:

$$\nu + n \longrightarrow e^- + p$$

وهكذا نرى أن ثمة صلة بين النيوترينو والإلكترون، كما توجد صلة مشابهة بين النيوترينو المضاد والبوزيترون. يمنع الحفاظ على الشحنة الكهربية النيوترينو المضاد من التفاعل مع النيوترون على نحو مشابِه لما سبق، لكن إذا التقى النيوترينو المضاد ببروتون، يمكنه الكشف عن نفسه كما يلي:

$$\overline{\nu} + p \longrightarrow e^+ + n$$

رأينا كيف تتحد ثلاثة كواركات من أجل تكوين جسيم كالبروتون أو النيوترون (بصفة عامة تُعرَف الجسيمات التي تتألف من ثلاثة كواركات باسم «الباريونات»). وهكذا تُعرَف الجسيمات التي تتألف من تجمُّع ثلاثة كواركات مضادة إجمالًا باسم الباريونات المضادة. ومن الممكن أن تتجمع الكواركات والكواركات المضادة. لذا، إذا

استخدمنا الرمز q للإشارة إلى الكوارك العلوي u أو السفلي d، واستخدمنا الرمز $\overline{q}$ للإشارة إلى الكواركات المضادة، فمن الممكن أن يصير لدينا أربع تجميعات ثنائية من الكواركات والكواركات المضادة $q\overline{q}$. ومثلما يُعرَف تجمُّع ثلاثة كواركات باسم الباريون، فإن هذا المزيج الثنائي من الكواركات والكواركات المضادة يُعرَف باسم «الميزون». وكما الحال مع البروتون والنيوترون، هناك حالات «تجاوب» عالية الطاقة لهذه الميزونات أيضًا.

أحد أشهر خواص المادة المضادة هو أنها حين تقابل المادة العادية، يفنى الاثنان في ومضة من الإشعاع، على غرار فوتون الضوء؛ لذا ليس من قبيل المفاجأة أن الميزونات لا تبقى طويلًا. فالكوارك والكوارك المضاد — المنحصران داخل الفمتو كَوْن البالغ حجمه ١٠^{-١٥} أمتار — يفني كل منهما الآخر خلال جزء على المليار من الثانية أو أقل من ذلك. لكن مع ذلك، تلعب الميزونات السريعة الزوال دورًا في بناء الكون، وأكثر الميزونات شيوعًا هي التركيبات الأخف المعروفة باسم «البايونات»، على غرار كل من الميزون باي π^+ (المكون من كوارك علوي وكوارك سفلي مضاد، $u\overline{d}$) وπ^- (المكون من كوارك سفلي وكوارك علوي مضاد $d\overline{u}$) والتي تنَبَّأ بها المُنظِّر الياباني يوكاوا عام ١٩٣٥ كجسيمات سريعة الزوال موجودة داخل الذرة، وتوفِّر القوة الشديدة الجاذبة التي تبقي على نواة الذرة متماسكة، وقد أكَّدَ الاكتشاف اللاحق لهذه الجسيمات عام ١٩٤٧ على صحة النظرية. واليوم، بتنا نعلم بشأن بنيتها الداخلية، ولدينا أيضًا فهم عميق للقوى المؤثرة على الكواركات، والكواركات المضادة، والتي منها تتألف الميزونات والباريونات وفي النهاية نواة الذرة (انظر الفصل السابع).

هناك تجميعتان متعادلتا الشحنة يمكننا تكوينهما: كوارك علوي وكوارك علوي مضاد $u\overline{u}$، وكوارك سفلي وكوارك سفلي مضاد $d\overline{d}$. وهاتان التجميعتان تؤلِّفان البايون المتعادل الشحنة الكهربية، π^0، وتعتبران بذرة ميزون آخَر، هو الميزون إيتا المتعادل الشحنة الكهربية، η. أما عن السبب وراء اتحاد كوارك منفرد بكوارك مضاد آخَر منفرد على هذا النحو، بينما تنجذب ثلاثة كواركات أو ثلاثة كواركات مضادة لبعضها من أجل تكوين الباريونات أو الباريونات المضادة، فهذا ما سنناقشه في الفصل التالي.

الفصل الخامس

المعجلات: الكونية والاصطناعية

الأشعة الكونية مجانية، بَيْدَ أنها عشوائية، وقد أدت بنا الحاجة إلى التجارب المجراة تحت السيطرة إلى بناء معجلات الجسيمات. يتناول هذا الفصل عمليةَ قصف أهداف معينة داخل المختبرات بحزم من الجسيمات، إضافةً إلى مصادمة حزم الجسيمات بعضها ببعض على نحو مباشِر، ومزايا كلا الطريقتين. أيضًا، نتناول مصادمة حزم المادة والمادة المضادة؛ الإلكترونات والبوزيترونات في مصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير، والبروتونات والبروتونات المضادة، ومصانع الجسيمات.

* * *

على مدار قرن استُخدِمت حِزَم الجسيمات للكشف عن البنية الداخلية للذرات، وقد تطورت هذه الحزم بدايةً من جسيمات ألفا وبيتا الموجودة طبيعيًّا بفضل النشاط الإشعاعي الطبيعي، مرورًا بالأشعة الكونية، ووصولًا إلى الحزم المركزة من الإلكترونات والبروتونات والجسيمات الأخرى داخل المعجلات الحديثة. وبواسطة قصف هدف محدَّد بحزمة من الجسيمات الأساسية، من الممكن تحويلُ بعض الطاقة إلى جسيمات جديدة، والتي يمكن تجميعها هي الأخرى على صورة حزمة ثانوية. وهكذا جرى إنتاج حزم البايونات والنيوترينوات، إضافةً إلى جسيمات أخرى تُسمَّى الكاوونات والميوونات، إلى جانب جسيمات مضادة على غرار البوزيترون والبروتون المضاد. بل إن ثمة حزمًا من الأيونات الثقيلة — ذرات مجردة من إلكتروناتها — تمكِّننا من دراسة التصادمات العنيفة بين الأنوية الثقيلة.

تسبر الجسيمات المختلفة المادة بصور متكاملة. ومن خلال جمع المعلومات من هذه الطرق المختلفة ظهرت الصورة الثرية التي نملكها في الوقت الحالي. أحيانًا تُوجَّه الحزم صوب أهداف ساكنة، لكن في السنوات القليلة الماضية كانت الاستراتيجية السائدة هي إحداث صدام بين حِزَم الجسيمات وحِزَم الجسيمات المضادة التي تدور على نحو معاكس لبعضها، على غرار مصادمة الإلكترونات والبوزيترونات أو البروتونات والبروتونات المضادة، وذلك على نحو مباشِر. هذه الطرق تمكِّننا من البحث في أسئلة كان من شأن إجاباتها دون ذلك أن تظل مستحيلة، كما سنرى لاحقًا.

أيضًا تجدَّد الاهتمام بالأشعة الكونية؛ إذ توفِّر الطبيعة جسيمات على طاقات أبعد بكثير عما يمكننا التفكير في تحقيقه على الأرض. المشكلة أن هذه الأشعة تأتي بصورة عشوائية، وهي أقل في شدتها من الحزم المكوَّنة داخل المعجلات. إن الرغبة في محاكاة الأشعة الكونية في ظروف محكومة هي التي أدت إلى تجارب الفيزياء الحديثة العالية الطاقة داخل المُعجِّلات. واليوم، بتنا ندرك أن الانفجار العظيم ربما أنتج جسيمات عجيبة، أثقل بكثير مما يمكننا إنتاجه يومًا على الأرض، لكنها تصلنا عبر الأشعة الكونية من حين لآخَر. وقد اكتشفنا جسيمات عجيبة (انظر الفصل الثامن) في الأشعة الكونية، ولاحقًا أخضعناها للتنظيم في تجارب المعجلات، وثمة أمل أن ينتظرنا حظ سعيد كهذا في المستقبل.

تطلق النجوم والمستعرات العظمى (السوبر نوفا) النيوترينوات، وقد شيدت مختبرات خاصة تحت الأرض بحيث تُحجَب الجسيمات كافة خلا أقدرها على الاختراق، كالنيوترينوات. إن علم فلك النيوترينوات فرع علمي جديد، ومن المتوقع أن يزدهر في العقود الأولى من القرن الحادي والعشرين. هناك أيضًا محاولات للعثور على دليل على الأحداث الشديدة الندرة، على غرار إمكانية أن تكون البروتونات غير مستقرة وأن تتحلَّل، حتى وإن كان نصف عمرها يفوق $١٠^{٣٢}$ أعوام. والطريقة المستخدمة هي امتلاك عينة ضخمة، بحجم عدة مسابح من الماء الصافي. ورغم أن البروتونات في المتوسط لها مثل هذا المدى العمري الطويل للغاية، فإن ميكانيكا الكم تقضي بأن البروتونات المنفردة قد تعيش أطول من ذلك، أو أقصر من هذا العمر. ومن ثَمَّ، في عينة كبيرة بحجم $١٠^{٣٣}$ بروتونات — كالتي توجد في مسبح مياه كبير — ربما يتحلَّل بروتون أو اثنان في غضون عام. وإذا انتظرت طويلًا بما يكفي، فربما تكون محظوظًا وتشهد حدوث ذلك الأمر.

هذه أمثلة على ما يُعرَف بالفيزياء غير المعتمدة على المعجلات، التي فيها تكون عمليات طبيعية قد أنتجت الجسيمات ونكشف نحن عن تأثيراتها. هنا على الأرض

يمكننا صنع حزم مركزة من الجسيمات العالية الطاقة في المختبرات بواسطة معجلات الجسيمات. وفي هذا الفصل سأركز على الكيفية التي تطورت بها المعجلات وما تتضمنه عملية صنعها. وهذا أيضًا سيعطينا فكرةً عن خطط المستقبل القريب في فيزياء الجسيمات العالية الطاقة.

تُعجَّل الجسيمات ذات الشحنة الكهربية بواسطة قوى كهربية. فإذا سلطت قوة كهربية كافية على الإلكترون، مثلًا، فسيتحرك على نحو أسرع وأسرع في خط مستقيم، كما في المعجل الخطي في ستانفورد بكاليفورنيا، الذي يستطيع تعجيل الإلكترونات حتى طاقات قدرها ٥٠ جيجا إلكترون فولت.

تحت تأثير مجال مغناطيسي، سينحني مسار الجسيم المشحون، وباستخدام المجالات الكهربية لتعجيل الجسيمات، والمجالات المغناطيسية لإحناء مسارها، يمكننا توجيه الجسيمات لتتحرك في دوائر مرارًا وتكرارًا. هذه هي الفكرة الأساسية الكامنة خلف الحلقات الضخمة، كذلك المعجل البالغ طوله ٢٧ كيلومترًا في مختبر سيرن بجنيف.

من السيكلوترون إلى السينكروترون

بدأت عمليات استكشاف الذرات باستخدام جسيمات ألفا وجسيمات بيتا المنبعثة من الأجسام المشعة، لكن هذه الجسيمات المنفردة لها طاقات صغيرة وقدرة محدودة على الولوج داخل البيئة النووية. وقد غيَّرت حِزَم الجسيمات العالية الطاقة كل هذا.

كانت الفكرة الأصلية تقضي بتعجيل الجسيمات إلى طاقة عالية من خلال سلسلة من الدفعات الصغيرة من الجهد الكهربي المتسارع المنخفض نسبيًّا. تتحرك الجسيمات خلال سلسلة من الأسطوانات المعدنية المنفصلة في أنبوب مفرَّغ، داخل هذه الأسطوانات لا يوجد مجال كهربي، وفيها تبحر الجسيمات بحرية، لكن عبر الفراغات التي تفصل بين الأسطوانات تنشأ مجالات كهربية عن طريق جهد كهربي متناوب، والذي يتناوب بين القيم السالبة والموجبة. يتناسب تردُّد الجهد المتناوب مع طول الأسطوانات، بحيث تستشعر الجسيمات على الدوام دفعة، وليس كبحًا، بينما تخرج إلى الفراغ بين الأسطوانات؛ وبهذه الطريقة تُعجَّل الجسيمات في كل مرة تعبر فيها من أسطوانة إلى أخرى. هذه هي آلية العمل الأساسية للمعجلات الخطية الحديثة. في المعتاد، تتسم هذه المعجلات الخطية بأنها آلات منخفضة الطاقة تمتد لمسافات قصيرة، لكن أحيانًا تكون عالية الطاقة وتمتد لمسافات طويلة على غرار معجل ستانفورد الخطي في كاليفورنيا،

وعادة ما يشيع استخدامها في المراحل التمهيدية لعملية التعجيل في المعجلات الحلقية الكبيرة القائمة اليوم.

بدأت فكرة استخدام المعجلات الحلقية على يد إرنست لورانس، الذي استخدم مجالًا مغناطيسيًّا لإحناء مسار الجسيمات بحيث تدور في مدار دائري. وُضِع تجويفان معدنيان نصف دائريين قبالة بعضهما على شكل حرفي D متقابلين بحيث كوَّنا دائرة يوجد في منتصفها فجوة صغيرة. بلغ قطر البناء كله نحو ٢٠ سنتيمترًا، ووضعه لورانس بين القطبين الشمالي والجنوبي المغناطيسيين لمغناطيس كهربي، وذلك كي يجعل الجسيمات تدور حول الجزء المنحني، بينما يعمل مجال كهربي موضوع في الفجوة على تعجيلها. بعد تعجيل الجسيمات في الفجوة بواسطة المجال الكهربي، اندفعت الجسيمات عبر الجزء المنحني إلى أن قابلت الفجوة مجدَّدًا بعد نصف دورة. بواسطة هذه الأداة تستطيع الجسيمات أن تعبر الفجوة المعجِّلة نفسها مرات عديدة، بدلًا من المرور بسلسلة من الفجوات كما في المعجل الخطي. تندفع الجسيمات على نحو حلزوني إلى الخارج مع تزايد سرعتها، لكن الفترات الزمنية الفاصلة بين مرات عبورها الفجوةَ تظل ثابتةً.

لتعجيل الجسيمات على نحو متواصل، يجب أن يُفتَح المجال الكهربي الموجود في الفجوة ويُغلَق بنفس التردد الذي تُكمِل وفقه الجسيمات دورتها. وهكذا تندفع الجسيمات المندفعة خارجة من مصدر في منتصف الجهاز الدوار على نحو حلزوني إلى الحافة، وتظهر حاملةً طاقةً أعظم بكثير.

عُرِف هذا الجهاز باسم المُعَجِّل الدوراني (السيكلوترون)، وكان قائمًا على مبدأ أن الجسيمات دائمًا ما تأخذ الوقت عينه لإكمال دورة واحدة. لكن من الناحية العملية، ليس هذا صحيحًا إلا على نحو تقريبي؛ فمع زيادة طاقة الجسيمات، تلعب تأثيرات النسبية الخاصة دورًا أكثر أهميةً بكثير، وعلى وجه التحديد، تكون هناك مقاومة متزايدة لعملية التعجيل، حيث تكون هناك حاجة لمزيد من القوة للحفاظ على نفس معدل التعجيل كلما اقتربنا من سرعة الضوء. وهكذا تأخذ الجسيمات المعجَّلة وقتًا أطول لإكمال دورتها، وفي النهاية تصل متأخرة للغاية إلى الفجوة بحيث تفوت عليها فرصة التقاط الجهد الكهربي المتناوب خلال الجزء الخاص بالتعجيل من دورتها.

كان الحل هو ضبط تردُّد الجهد بحيث يظل متوافقًا مع الجسيمات بينما تأخذ وقتًا أطول في دورانها، لكن هناك مشكلة: فالآلة التي تعمل على تردُّد متفاوت لن يعود بمقدورها تعجيل تيار متواصل من الجسيمات، مثلما فعل السيكلوترون، وتغيير

التردد كي يتزامن مع الجسيمات العالية الطاقة سيعني أن أي جسيمات لا تزال طاقتها منخفضة لن تجاري نظيرتها عالية الطاقة. بدلًا من ذلك، يأخذ «سيكلوترون متزامن» الجسيماتِ من المصدر دفعة واحدة في كل مرة، ثم يعجلها وصولًا إلى حافة المغناطيس.

تمكَّنَ السيكلوترون المتزامن من تعجيل البروتونات إلى طاقات كافية بحيث أنتجت التصادمات مع الأنوية البايونات؛ أخف الجسيمات التي تتكون، كما نعرف الآن، من كوارك وحيد وكوارك مضاد، ومع ذلك كان قطر الآلة نحو خمسة أمتار، وكان الوصول إلى طاقات أعلى، كتلك المطلوبة لإنتاج الجسيمات الغريبة الأثقل، أمرًا غير عملي.

كان الحل هو زيادة شدة المجال المغناطيسي على نحوٍ متواصل بينما تكتسب الجسيمات الدوارة الطاقة، وبهذا نحافظ عليها في المدار نفسه بدلًا من تركها تندفع إلى الخارج. علاوة على ذلك، من الممكن الاستعاضة عن المغناطيس الواحد العملاق المستخدم في السيكلوترون بحلقة أشبه بالكعكة من المغناطيسات الأصغر، وهذا هو الشكل المألوف لحلقات المعجلات الحديثة. تتحرك الجسيمات عبر أنبوب دائري مفرَّغ محاط بالمغناطيسات، وتُعجَّل الجسيمات خلال كل دورة بواسطة جهد متناوب ذي تردُّد متنوع، والذي يوجَّه في موضع أو أكثر على امتداد الحلقة، وتبقى الجسيمات على مسارها الدائري عبر الأنبوب بواسطة الشدة المتزايدة على نحو ثابت للمجال المغناطيسي. هذه الآلة تُسمَّى المعجل الدوراني التزامني (السينكروترون)، وهي لا تزال أساس معجلات الجسيمات الكبرى. وقد شيدت أولى السينكروترونات الكبيرة في مختبر بروكهافن في الولايات المتحدة وسيرن بجنيف، بطاقاتٍ تصل إلى ٣٠ جيجا إلكترون فولت في عام ١٩٦٠.

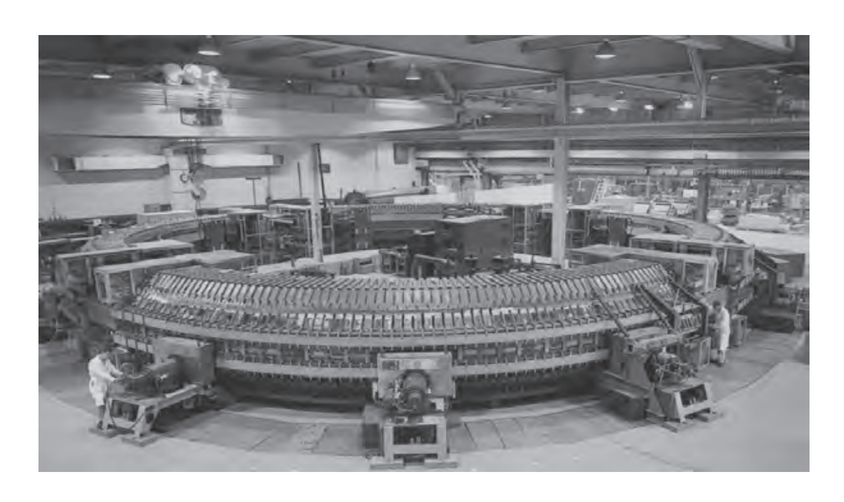
في ستينيات القرن العشرين، ظهرت فكرة الكواركات، ومعها جاء التحدي المتمثِّل في الوصول إلى طاقات تزيد عن المائة جيجا إلكترون فولت، أملًا في الإطاحة بالكواركات خارج البروتونات. أدت التحسينات التكنولوجية إلى تصنيع مغناطيسات أقوى، وعن طريق وضع المغناطيسات في حلقة قطرها يزيد على الكيلومتر، تمكَّن مختبر فيرميلاب قرب شيكاجو بالولايات المتحدة ومختبر سيرن في جنيف بحلول منتصف السبعينيات من الوصول بالبروتونات إلى طاقة مقدارها ٥٠٠ جيجا إلكترون فولت. وبحلول عام ١٩٨٢ تمكَّنَ مختبر فيرميلاب من الوصول إلى طاقة مقدارها ١٠٠٠ جيجا إلكترون فولت، أو «١ تيرا إلكترون فولت»، وصار يُعرَف باسم «تيفاترون».

واليوم، تمكِّننا المغناطيسات ذات التوصيل الفائق من عمل مجالات مغناطيسية أقوى من ذلك. وفي مختبر فيرميلاب، إلى جانب تيفاترون، هناك حلقة أصغر تُعرَف



شكل ٥-١: كان قطر معجل لورانس الدوراني الأصلي ١٣ سنتيمترًا فقط، وكان المجال المغناطيسي الذي يوجِّه الجسيمات إلى مسارها الدائري يوفِّره مغناطيسان كهربيان، واللذان كانا يولدان مجالًا عموديًّا من الشمال إلى الجنوب عبر مسار الجسيمات، المحتواة داخل سطح أفقي. يتم تعجيل الجسيمات بواسطة مجال كهربي، وهو ما يُوفَّر عبر فجوة موجودة بين الغرفتين المعدنيتين المفرغتين على شكل حرف D. يوفر مصدر إشعاعي موضوع في المنتصف الجسيمات، وتلتف الجسيمات حول المجال المغناطيسي للسيكلوترون، لكن بينما تزداد طاقتها، يقل معدل انحنائها؛ ومن ثَمَّ تدور على نحو حلزوني إلى الخارج، إلى أن تخرج من الآلة.[1]

باسم «المحقن الرئيس»، وأحد المهام الأساسية للمحقن الرئيس هي توجيه البروتونات على طاقة مقدارها ١٢٠ جيجا إلكترون فولت نحو أهداف من أجل إنتاج حِزَم ثانوية من الجسيمات بغرض إجراء التجارب عليها. تضرب البروتونات المستخلصة أهدافًا خاصة من الكربون أو البيريليوم لإنتاج تيارات من البايونات والكاوونات. يُسمَح للبايونات بالتحلل من أجل إنتاج حزمة من النيوترينوات، بينما يمكن فصل الكاوونات لعمل حزمة من الكاوونات بغرض إجراء التجارب عليها. الجسيمات المختلفة ذات الخواص المختلفة تستكشف سمات مختلفة للأهداف وتساعد على بناء صورة أكثر ثراءً عن تكوينها.



شكل ٥-٢: معجل «كوزموترون» في مختبر بروكهافن الوطني كان أول معجل دوراني تزامني (سينكروترون) للبروتونات يتم تشغيله، في عام ١٩٥٢، وكان يعجل البروتونات إلى طاقات قدرها ٣ جيجا إلكترون فولت. كانت الحلقة المغناطيسية مقسَّمَةً إلى أربعة أقسام (أقربها واضحة تمام الوضوح في الصورة)، وكل منها يتألف من ٧٢ كتلة من الصلب، أبعادها تبلغ ٢٫٥ متر × ٢٫٥ متر، وبفتحة أبعادها ١٥ سنتيمترًا × ٣٥ سنتيمترًا، كي تمر الجسيمات من خلالها. وقد توقَّفَ عن العمل في عام ١٩٦٦.[2]

أيضًا يوجِّه المحقن الرئيس بروتونات ذات طاقة قدرها ١٢٠ جيجا إلكترون فولت صوب هدف خاص من النيكل على طاقات تكفي لإنتاج المزيد من البروتونات والبروتونات

المضادة بمعدل قدره ٢٠٠ مليار بروتون مضاد في الساعة. للبروتونات المضادة — نسخة المادة المضادة من البروتونات — شحنة كهربية سالبة لا موجبة، وهذا يعني أن بمقدورها الدوران حول حلقة التيفاترون من مغناطيسات التوصيل الفائق بنفس زمن وسرعة دوران البروتونات، لكن في الاتجاه المعاكس. وما إن تصل الجسيمات إلى طاقة ١٠٠٠ جيجا إلكترون فولت — ١ تيرا إلكترون فولت — يُسمَح للحزمتين بالاصطدام على نحو مباشر، ويكون التيفاترون قد حقَّق هدفه النهائي: مصادمة البروتونات والبروتونات المضادة على طاقات تعيد إنتاج الظروف التي كان عليها الكون، بينما كان يبلغ من العمر جزءًا على التريليون من الثانية.

وفي سيرن، ترشد حلقة طولها ٢٧ كيلومترًا من هذه المغناطيسات البروتوناتِ على طاقاتٍ مقدارها ٧ تيرا إلكترون فولت في «مصادم الهادرونات الكبير». تستطيع المغناطيسات الخاصة توجيه حزمتين تدوران على نحو متعارض من البروتونات، أو من الأنوية الذرية، بحيث تتصادمان مباشَرَةً. وهذه ستكون ذروة تكنولوجيا الحزم المتصادمة، التي صارت استراتيجية أساسية في الفيزياء العالية الطاقة في السنوات الأولى من القرن الحادي والعشرين.

المعجلات الخطية

معجل ستانفورد الخطي هو أطول معجل خطي في العالم، وهو يعجل الإلكترونات حتى طاقة قدرها ٥٠ جيجا إلكترون فولت في ثلاثة كيلومترات وحسب، بينما في مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير تصل الإلكترونات إلى طاقة قدرها ١٠٠ جيجا إلكترون فولت، لكنها تتطلب حلقة طولها ٢٧ كيلومترًا لتحقيق ذلك. لماذا هذا الاختلاف؟ وما الذي يحدِّد ما إنْ كنَّا سنصنِّع معجلًا خطيًّا أم دائريًّا؟

تعمل معجلات الإلكترونات الدورانية التزامنية — السينكروترونات — على نحو طيب، إلا أن هناك مشكلة وحيدة أساسية: أن الإلكترونات العالية الطاقة تشع طاقة بينما تتحرك في مسار دائري، هذا الإشعاع — المعروف باسم الإشعاع السينكروتروني — يصير أشد قوةً كلما قلَّ نصف قطر المدار، وكلما عظمت طاقة الجسيم. البروتونات أيضًا تشع إشعاعًا سينكروترونيًّا، لكن لأنها أضخم بنحو ألفي مرة من الإلكترونات، فإنها تستطيع الوصول إلى طاقات أعلى بكثير قبل أن يصير مقدار الطاقة المفقود ذا أهمية. لكن حتى على طاقة مقدارها بضعة جيجا إلكترون فولت، تشع الإلكترونات التي تدور



شكل ٥-٣: نظرة داخل النفق الدائري لمصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير في سيرن البالغ طوله ٢٧ كيلومترًا (١٧ ميلًا)، والذي امتد العمل به من عام ١٩٨٩ إلى عام ٢٠٠٠. تتحرك الإلكترونات والبوزيترونات في اتجاهات متقابلة في أنبوب الحزم عن طريق مئات من المغناطيسات البنية والبيضاء (الثنائية القطب) التي تحني الحزم والمغناطيسات الزرقاء (الرباعية القطب) التي تركزها. في البداية كان مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير يعجل الحزم وصولًا إلى طاقةِ تصادُمٍ إجمالية قدرها نحو ٩٠ جيجا إلكترون فولت، لكن بحلول وقت إغلاقه في أكتوبر عام ٢٠٠٠، بلغ أكثر من ٢٠٠ جيجا إلكترون فولت.[3]

في المعجلات الدورانية قدرًا عظيمًا من الطاقة، وهو ما يجب تعويضه من خلال ضخِّ المزيد من الطاقة عبر موجات الراديو في الفراغات المعجِّلة؛ ولهذه الأسباب ظلت معجلات الإلكترونات العالية الطاقة خطية حتى وقت قريب. في الواقع، استُخدِمَت الإلكترونات في المعجلات الدورانية فقط من أجل المزايا الخاصة التي تقدمها، وتحديدًا أن التصادمات المباشرة وجهًا لوجه تستغل الطاقة على نحو أكثر كفاءةً بكثير عما هو الحال حين يُضرَب هدفٌ ساكن. المزية الثانية الضخمة هي القدرة على الاستكشاف بطرق قد تكون دون ذلك مستحيلة، كما الحال مثلًا داخل مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير،



شكل ٥-٤: المعجل الخطي البالغ طوله ثلاثة كيلومترات (ميلين) في مركز معجل ستانفورد الخطي. تبدأ الإلكترونات من معجل مبدئي «دافع»، حيث تنطلق من سلك كهربي مسخن، وهو يظهر في نهاية المعجل أسفل يسار الصورة. بعد ذلك تنطلق الإلكترونات على امتداد موجات الراديو التي تبثها سلسلة من ١٠٠ ألف «تجويف» حلقي من النحاس، يبلغ قطر الواحد منها نحو ١٢ سنتيمترًا. المعجل لا يحيد في استقامته على طول مساره الكامل بأكثر من نصف مليمتر، وهو موضوع داخل نفق تحت الأرض بثمانية أمتار. المباني الظاهرة على السطح على امتداد المعجل تحتوي على الكليسترونات، التي توفِّر موجات الراديو.[3]

حيث تفنى الإلكترونات لدى التقائها بالبوزيترونات، وتكون الحزم التي تدور على نحو معاكس هي الوسيلة الوحيدة الفعَّالة لتحقيق الشدة العالية المطلوبة.

كان مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير معجلًا دورانيًّا يمتد داخل نفق طوله ٢٧ كيلومترًا. ويقدم هذا المعجل دليلًا على المشكلات التي نواجهها عندما تتحرك الإلكترونات والبوزيترونات الخفيفة في دوائر؛ إذ إننا بحاجة لكل هذه المسافة كي نمكِّنها من الوصول إلى طاقة قدرها ١٠٠ جيجا إلكترون فولت دون إهدار قدر كبير من الطاقة على صورة إشعاع. إن الوصول إلى طاقات قدرها عدة مئات من الجيجا إلكترون فولت في مدارات دائرية يحتاج إلى مسافات تمتد لمئات الكيلومترات، وهو أمر مستحيل؛ ولهذا السبب يُخطَّط لاستخدام مصادمات خطية في المستقبل البعيد.

الفكرة هنا هي أن يكون لدينا معجل خطي للإلكترونات وآخَر للبوزيترونات، وباستخدام تكنولوجيا التعجيل الحديثة، وطول يُقدَّر بعدة أميال، قد يكون من الممكن إحداثُ تصادمات على طاقاتٍ إجمالية قدرها عدة مئات من الجيجا إلكترون فولت. وفي مثل هذه الطاقات سيكون من الممكن إنتاج الكواركات العلوية والكواركات العلوية المضادة، وفي النهاية بوزون هيجز (انظر الفصل العاشر).

يتطلب الحصول على فرصة طيبة للتصادم داخل معجل خطي — حيث تلتقي الحزمتان مرة واحدة فقط — حزمتين عاليتي الكثافة، يبلغ قطر الواحدة منهما أقل من ميكرون واحد (١٠$^{-٦}$ أمتار). في الواقع العملي تخطئ الحزم بعضها أكثر مما تصيب. وبما أن الشحنات المتشابهة داخل كل حزمة تتنافر، فإن صنع مثل هذه الحزم العالية التركيز والتحكم بها لَهُو تحدٍّ تكنولوجي.

المصادِمات

في المعالج الخطي المُوجَّه صوب هدف ساكن، يندفع الحطام الناتج عن عملية التصادم إلى الأمام، تمامًا مثلما تندفع السيارة إلى الأمام حين تصطدم بها سيارة أخرى من الخلف. وحين تصطدم حزمة الجسيمات بهدف ساكن، تتحول طاقة الحزمة المكتسبة بعد جهد جهيد إجمالًا إلى طاقة حركة — جسيمات متحركة في الهدف — ومن ثَمَّ فهي تُهدَر بالأساس. يتم التغلُّب على هذه المشكلة إذا جعلنا الجسيمات تتصادم مباشَرَةً وجهًا لوجه، بحيث يمكن أن تستهلك طاقتها في التفاعل بينها. في مثل هذا التصادم يتطاير الحطام في كل اتجاه، ويعاد توزيع الطاقة معه، فلا «يُهدَر» شيء عند جعل الكتل الساكنة تتحرك.

هذه الأمور كانت واضحةً لبناة المعجلات منذ وقت بعيد يرجع إلى أربعينيات القرن العشرين، بَيْدَ أن الأمر استغرق عشرين عامًا حتى تتخذ مصادمات الجسيمات شكلها، وخمسة عشر عامًا أخرى حتى تصير الشكل المهيمن من معجلات الجسيمات، وهو ما استمرت عليه إلى اليوم. المشكلة هي أن الجسيمات تميل إلى أن يخطئ بعضها بعضًا، وفقط خلال الثلاثين عامًا الماضية صارت التقنيات قابلة للتطبيق.

كان التطبيق الأساسي هو تمكين حدوث التصادمات بين الجسيمات والجسيمات المضادة، وبالأساس بين البروتونات والبروتونات المضادة، أو الإلكترونات والبوزيترونات.

البروتونات مجموعة من الكواركات، والبروتونات المضادة بالمثل مجموعة من الكواركات المضادة. وبكتلة تبلغ نحو ألفي مرة قدر كتلة الإلكترون، تعاني البروتونات والبروتونات المضادة فقدًا أقل في الإشعاع السينكروتروني، كما أنها تصطدم بقوة أكبر. ومن ثَمَّ فقد صارت الخيار الأساسي عندما يكون الهدف هو الوصول إلى طاقات أعلى غير مكتشفة من قبلُ. كان هذا هو الحال عام ١٩٨٣ حين قادت الاصطدامات المباشرة بين البروتونات والبروتونات المضادة في سيرن إلى اكتشاف كلٍّ من البوزون $W^\pm$ والبوزون Z^0، اللذين يحملان القوة النووية الضعيفة (انظر الفصل السابع). ومع هذا، كانت الاصطدامات تؤدي إلى الكثير من الحطام، وكان العثور على البوزون W والبوزون Z أشبه بمحاولة العثور على إبرة في كومة من القش. إن طاقة البروتون موزَّعة بين الكواركات المكونة له، ومن قبيل المصادفة أن تكون طاقة الكوارك المنفرد الذي يقابل كواركًا مضادًّا مساوية لتلك المطلوبة لتكوين البوزون Z^0 أو البوزون $W^\pm$. رغم ذلك، فهذه الجسيمات ظهرت مرةً في المليون كحالات خاصة في مجموعة الصور الملتقَطَة للتصادمات. تمثَّلَ التحدي وقتها في إنتاج بوزون Z^0 على نحو منتظم دون ذلك الحطام المربك غير المرغوب فيه، وقد أمكن فعل هذا فقط عن طريق ضبط حزمة من الإلكترونات والبوزيترونات بحيث تكون في مستوى الطاقة المرغوب. وقد أدَّى هذا إلى بناء مصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير. ومن الممكن توضيح التحديات الفنية التي تكتنف التجارب المجراة باستخدام هذه المعجلات من خلال دراسة حالة مصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير.

حين بدأ مصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير العمل في تسعينيات القرن العشرين، كانت مجموعات رفيعة للغاية من الإلكترونات يمر بعضها من خلال بعض في قلب الكواشف كل ٢٢ ميكروثانية (٢٢ جزءًا على المليون من الثانية). ورغم احتواء كل مجموعة على نحو مليون مليون إلكترون، إلا أنها كانت مشتتة؛ لذا كان التفاعل بينها شحيحًا. وقد كان التصادم المثير للاهتمام — أو «الحدث» — يقع مرةً واحدةً فقط كل أربعين مرة أو نحو ذلك، تمر فيها مجموعات الإلكترونات بعضها ببعض. تمثَّلَ التحدي في تحديد الأحداث المثيرة للاهتمام وتجميعها، وعدم تفويتها أثناء تسجيل أي أحداث أخرى متواضعة الأهمية. كان «زناد» إلكتروني يستجيب لأولى الإشارات الآتية من التصادم من أجل أن «يقرِّر» في غضون ١٠ ميكروثانية ما إذا كان شيءٌ يستحق الاهتمام قد وقع. وإذا كان الحال كذلك، يتم البدء في عملية القراءة وجمع المعلومات من

كل أجزاء الكاشف، وتعيد شاشة الكمبيوتر بناءَ نمطِ مسارات الجسيمات وتبيِّن أين ترسَّبَتِ الطاقة في الكاشف.

في الوقت الحالي، يجري بناء مصادم للبروتونات والأنوية الذرية ليحل محل مصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير. هذا هو «مصادم الهادرونات الكبير». سيعجل هذا المصادم البروتونات إلى طاقة مقدارها ٨ ملايين مليون إلكترون فولت (٨ تيرا إلكترون فولت) لكل حزمة، بحيث تصطدم بطاقة إجمالية قدرها ١٦ تيرا إلكترون فولت. هذا يساوي نحو مائة مرة مقدار الطاقة الناتجة عن تصادمات مصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير، ويساوي نحو عشر مرات مقدار الطاقة الناتجة عن تصادمات البروتونات والبروتونات المضادة في فيرميلاب.

في هامبورج هناك مصادم فريد غير متناظر، وفيه تصطدم حزمة من البروتونات بحزمة من الإلكترونات أو البوزيترونات. والتصادمات الناتجة تمكِّن من استكشاف البنية الداخلية للبروتونات، والكواركات، وصولًا إلى مسافات قدرها $١٠^{-١٩}$ أمتار.

المصانع

في السنوات الأخيرة، بات لغز الاختلاف بين المادة والمادة المضادة موضع تركيز، وقد أدى هذا إلى اهتمام شديد بخصائص الجسيمات الغريبة والجسيمات المضادة — الكاوونات — التي اكتُشِف وجود تناظُر طفيف فيها منذ نحو خمسين عامًا، والجسيمات القاعية الشبيهة بها (انظر الفصل الثامن) التي تم التنبؤ بوجود تناظر كبير بينها. وقد أدى هذا إلى مفهوم «مصانع» الجسيمات، القادرة على إنتاج أكبر كَمٍّ ممكن من الكاوونات أو الميزونات القاعية.

الفكرة هي إنتاج الإلكترونات والبوزيترونات على طاقات محدَّدة، تكون «مضبوطة» بحيث تنتج الكاوونات أو الميزونات القاعية، على الترتيب، على حساب الأنواع الأخرى من الجسيمات. في فراسكاتي، قرب روما، يوجد «دافني»، وهو مصادم صغير يمكن وضعه في قاعة أكبر قليلًا من صالة التدريبات الرياضية. وهناك تفني الإلكترونات والبوزيترونات بعضها على طاقات قدرها ١ جيجا إلكترون فولت فقط، وهو الأمر المثالي لإنتاج الكاوونات.

كما يُحدِث «مصنع الميزونات القاعية» تصادمات بين الإلكترونات والبوزيترونات على طاقات قدرها نحو ١٠ جيجا إلكترون فولت، والمضبوطة بحيث تنتج الميزونات

القاعية وجسيماتها المضادة معًا. ومن فرط صعوبة التحدي جرى بناء معجلين في أواخر التسعينيات، وهما المعجل بي إي بي ٢ في ستانفورد بكاليفورنيا، والمعجل كيه إي كيه بي في مختبر كيه إي كيه باليابان.

تختلف مصانع الميزونات القاعية عن مصادمات الإلكترونات-البوزيترونات السابقة بصورة مثيرة للاهتمام. ففي مصادمات الإلكترونات-البوزيترونات التقليدية، تتحرك الحزم في اتجاهات متقابلة لكن بالسرعة عينها، بحيث إنه عندما تتقابل الجسيمات فإن بعضها يلغي حركة بعض. ويكون «الانفجار» الناتج عن إفناء الإلكترونات والبوزيترونات بعضها بعضًا ساكنًا، وتظهر الجسيمات الجديدة من المادة والمادة المضادة بانتظام في كل الاتجاهات. لكن في مصانع الميزونات القاعية، تتحرك الحزم المتصادمة بسرعات مختلفة، وهو ما يجعل الانفجار الناتج نفسه متحركًا.

نتيجة لهذا التصادم غير المتناظر، تميل المادة والمادة المضادة الناتجة إلى الانطلاق في اتجاه الحزمة المبدئية الأسرع، وبسرعات أعلى مما يحدث في حالة حدوث الإفناء في حالة سكون. وهذا لا يسهل عملية رصد الجسيمات المتكونة وحسب، بل أيضًا الذرية التي تخلفها حين تفنى؛ وذلك بفضل أحد تأثيرات النسبية الخاصة (الإبطاء الزمني) والذي يتسبب في جعل الجسيمات تعيش لمدة أطول وتتحرك لمسافة أكبر (نحو مليمتر واحد) عندما تتحرك بسرعة عالية. ولهذا أهمية بالغة؛ لأن الميزون القاعي، في حالة السكون، يعيش فقط لمدة واحد بيكو ثانية؛ أي جزء على مليون المليون من الثانية، وهذا يقع على حدود قدرتنا على القياس.

ثمة خطط جارية لبناء مصانع للنيوترينوات، حيث ستمكِّننا المصادر القوية للنيوترينوات من دراسة هذه الجسيمات المبهمة. إن كتلة النيوترينوات صغيرةٌ للغاية بحيث يستحيل قياسها، بَيْدَ أنه يمكن الحصول على قياسات غير مباشرة للاختلافات في كتلتها. بل إن هناك إمكانية أن النيوترينوات قد تتحول إلى نيوترينوات مضادة والعكس، وستكون لتحوُّلِ شكل من أشكال المادة إلى شكل من المادة المضادة تبعاتٌ مهمة على فهمنا لهذا التناظر العميق. وهذه التأثيرات من الممكن قياسها في مصانع النيوترينوات المناسبة.

وأخيرًا، يعمل الاكتشاف المتوقَّع لبوزون هيجز في عام ٢٠١٢ والذي تبلغ كتلته ١٢٥ جيجا إلكترون فولت من بين الحطام المتخلف عن مصادمة البروتونات بالبروتونات أو البروتونات المضادة، على تولية قدر من الاهتمام لإنتاج أعداد ضخمة منها في ظروف

أكثر إحكامًا. ولعمل ذلك، من المخطط إجراءُ تصادمات بين الإلكترونات والبوزيترونات على طاقات عظمى تبلغ ١٢٥ جيجا إلكترون فولت؛ ومن ثَمَّ يكثر الحديث عن بناء معجلين خطيين، أحدهما للإلكترونات والآخَر للبوزيترونات، وضبطهما بحيث ينتجان تصادمات مباشِرة لحزم الجسيمات. هذا هو الشكل الذي من المرجح أن يكون عليه مستقبل الفيزياء التجريبية العالية الطاقة فيما يخص المعجلات.

هوامش

(1) Photo: Lawrence Berkeley National Laboratory. Illustration: © Gary Hincks.

(2) Courtesy of Brookhaven National Laboratory.

(3) © David Parker/Science Photo Library.

الفصل السادس

الكواشف: الكاميرات وآلات الزمن

يستعرض هذا الفصل قرنًا من العمل بالكواشف. كانت غرف الفقاعات عظيمة الفائدة منذ خمسين عامًا، لكن الإلكترونيات الحديثة تَعِد بما هو أكثر بكثير. أيضًا يستعرض الفصل غرف الشرارات وسلالتها، واللفائف السويسرية في مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير، بالإضافة إلى كواشف بحجم السفن الحربية من أجل مصادم الهادرونات الكبير. كما يستعرض الفصل الصور المأخوذة بهذه الكواشف، وكيف تميِّز بين الأنواع المختلفة للجسيمات وتمكِّننا من فك شفرة التصادمات.

* * *

الطرق المبكرة

إن وسائل الكشف عن الجسيمات دون الذرية أكثر شيوعًا مما يعتقد الكثير من الناس. وما طقطقة عداد جايجر، والضوء المنبعث حين تضرب الجسيمات المشحونة كهربيًّا — كالإلكترونات — موادَّ مجهَّزَة على نحو خاص، بحيث تكوِّن صورة على شاشة التلفاز؛ إلا مثالان فقط.

اكتشف رذرفورد نواة الذرة من خلال تأثيرها على حزم جسيمات ألفا، التي تشتَّتت عبر زوايا واسعة. وقد استخدم موادَّ وامضة كي يكشف عنها بينما تتشتت مرتدة عن نواة الذرة. وقد استخدم رذرفورد وزميلاه أعينَهم لرؤية الومضات وعدها، وبحلول خمسينيات القرن العشرين أتمتت المكونات الإلكترونية عملية عدِّ الومضات الصادرة عن المواد الوامضة البلاستيكية الحديثة.

حين يتحرك جسيم مشحون عبر أحد الغازات فإنه يخلف وراءه أثرًا من الذرات المؤينة. ويعتمد نطاق كامل من كواشف الجسيمات — من الغرف السحابية إلى غرف الشرارات السلكية — على استشعار هذا الأثر من الذرات المؤينة بالطريقة عينها.

منذ قرن تقريبًا تمكَّنَ رذرفورد بواسطة هذه السبل من الكشف عن جسيمات ألفا المنبعثة من الراديوم، جسيمًا جسيمًا.

تمثلت السمة المحورية في أن الكاشف يمكنه أن يعظِّم على نحو بالغ مقدار التأين الضئيل الذي يسبِّبه مرور جسيم ألفا واحد. وكان الكاشف يتكوَّن من أنبوب نحاسي مفرَّغ منخفض الضغط يمر في مركزه سلك رفيع. كانت تُمرَّر شحنة قدرها ألف فولت بين السلك والأنبوب، وهو ما ينشئ مجالًا كهربيًّا. في ظل هذا الترتيب، حين يمر جسيم مشحون عبر الغاز المخلخل، تنتج الأيونات. تنجذب الأيونات نحو السلك، وبينما تتزايد سرعتها فإنها تؤين المزيد من الغاز، مما يعظم الأثر المبدئي. ويمكن لأيون واحد أن ينتج ألف أيون، وكل هذا ينتهي به المطاف في السلك المركزي، منتجًا نبضة من الشحنة الكهربية كبيرة بما يكفي كي يلتقطها مقياس كهربي حسَّاس موصل بالسلك.

في «عداد جايجر» الحديث، المجال الكهربي عند السلك ضخم للغاية لدرجة أن إلكترونًا منفردًا في أي مكان في العداد يمكنه أن يسبِّب موجة هائلة من التأيين، بحيث إن أقل قدر من التأيين ينتج إشارة.

رغم أن هذا يكشف عن وجود إشعاع، فإنه بعيد للغاية عما هو مطلوب للكشف عن الجسيمات في التجارب العالية الطاقة الحديثة. وهذه الكواشف تُستخدَم بالتوازي مع كواشف أخرى. ولمعرفة كيف يتم هذا، من المفيد أن نلقي نظرة على تطور عملية الكشف عن الجسيمات.

أول الكواشف القادرة على إظهار آثار الجسيمات المشحونة كانت الغرفة السحابية، التي هي غرفة غاز مزوَّدة بمكبس ومملوءة ببخار الماء، وحين نسحب المكبس بسرعة فإن التمدد السريع يبرد الغاز وتتكون سحابة في هذا الجو البارد الرطب، وحين تعبر جسيمات ألفا وبيتا الناتجة عن النشاط الإشعاعي فإنها تؤين الذرات الموجودة في البخار وتتكون قطيرات غائمة على الفور حول مسارها، وحين تضاء الغرفة، تبرز هذه المسارات كما تظهر ذرات الغبار في شعاع الشمس.

استُخدِمَت الغرفة السحابية للكشف عن الجسيمات في الأشعة الكونية، وقد تحسنت كفاءتها من خلال الجمع بينها وبين عداد جايجر. فإذا وضعنا عداد جايجر أعلى الغرفة

وآخَر أدناها وانطلق كلاهما في الوقت عينه، فمن المرجح بشدة أن شعاعًا من الأشعة الكونية قد مرَّ بينهما، وبالتبعية من خلال الغرفة. ويمكن توصيل عدَّادَيْ جايجر بآلية حركة بحيث إن النبضة الكهربية الناتجة عن التفريغ المتزامن للعدَّادين تسبِّب تمدُّد الغرفة السحابية، وتمكِّن ومضة ضوء من التقاط المسارات على فيلم تصوير.

وقد اكتُشِف أول الأمثلة على الجسيمات المضادة، البوزيترون، وأيضًا جسيمات عجيبة في الأشعة الكونية بواسطة الغرفة السحابية. ومع ذلك، فقد حل استخدام الأفلام الحساسة محل هذه الوسيلة.

الأفلام الحساسة

لعبت ألواح التصوير الفوتوغرافي دورًا بارزًا في أولى الأبحاث المجراة على النشاط الإشعاعي، بل إن الأشعة السينية والنشاط الإشعاعي اكتُشِفَا لأول مرة من خلال إعتامهما لألواح التصوير الفوتوغرافي.

في أواخر أربعينيات القرن العشرين، صارت أفلام التصوير الفوتوغرافي العالية الجودة متاحة، وحين أُخِذت هذه الأفلام إلى ارتفاعات عالية بواسطة المناطيد، أنتجت لنا أولى الصور الجميلة لتفاعلات الأشعة الكونية.

هذه الأفلام كانت حسَّاسة على نحو خاص للجسيمات العالية الطاقة، فمثلما يسبِّب الضوء الشديد إعتام ألواح التصوير الفوتوغرافية، يتسبَّب مرور الجسيمات المشحونة في الأثر عينه. وبمقدورنا الكشف عن مسار جسيم وحيد من خلال خط الحبيبات المعتمة الذي يخلفه على الفيلم الحساس بعد تحميضه. إن الجسيم يلتقط صورة لنفسه حرفيًّا، وتكفي مجموعة بسيطة من الألواح المغطاة بالأفلام الحساسة لجمع مسارات الجسيمات، بينما الغرفة السحابية — على النقيض من ذلك — جهازٌ معقَّدٌ يحتاج إلى أجزاء ميكانيكية متحركة حتى يكون بالإمكان التمدد في الغرفة وضغطها على نحو متواصل؛ ونتيجة لذلك صارت الأفلام الحساسة، ولا تزال، وسيلةً مفيدة في الكشف عن مسارات الجسيمات المشحونة وتسجيلها.

غرفة الفقاعات

تسبَّبَ ابتكار المعجلات في إنتاج الجسيمات العالية الطاقة، وهذا خلق تحديات جديدة تتعلق بعملية الكشف عن هذه الجسيمات، فالجسيمات المحمومة تتطاير في أرجاء الغرفة

السحابية دون أن تتفاعل مع الذرات في الغاز الرقيق للغرفة. على سبيل المثال، يتطلَّب تسجيل الحياة الكاملة لأحد الجسيمات العجيبة — من الإنتاج وحتى التحلل، على طاقات قدرها بضعة جيجا إلكترون فولت — غرفة سحابية طولها مائة متر! إضافة إلى ذلك، الغرف السحابية بطيئة؛ فدورة إعادة الضغط بعد عملية التمدُّد يمكن أن تستغرق نحو دقيقة، وبحلول الخمسينيات كانت معجلات الجسيمات تنتج نبضات من البروتونات كل ثانيتين.

ما كنَّا بحاجة إليه هو كاشف يمكنه التقاط المسارات الطويلة للجسيمات العالية الطاقة، ويكون قادرًا على العمل بسرعة. كانت الغازات أضعف من أن تتمكَّن من أداء المهمة، وكانت السوائل أفضل؛ لأن كثافتها الأكبر تعني أنها تحتوي على عدد أكبر بكثير من الأنوية التي يمكن لكل جسيم عالي الطاقة أن يتفاعل معها؛ وهذا يأخذنا إلى غرفة الفقاعات. الفكرة الأساسية لهذه الوسيلة تنبع مما يحدث حين تُبقِي سائلًا ما تحت ضغطٍ، قريبًا جدًّا من نقطة الغليان، فإذا خفضت الضغط في هذه الظروف فسيبدأ السائل في الغليان، لكن إذا خفضت الضغط على نحو مفاجئ للغاية، فسيظل السائل سائلًا رغم أن حرارته الآن تعدَّتْ درجة الغليان. تُعرَف هذه الحالة باسم «فرط إحماء السائل»، ولأن السائل وقتها يكون غيرَ مستقرٍّ، لا يمكن لهذه الحالة أن تستمر طويلًا دون أن يحدث ما يسبِّب الخلل للسائل.

إذا استعدنا الضغط الطبيعي نستعيد الحالة الأصلية على الفور. والجسيمات التي تدخل السائل خلال اللحظات الحرجة للضغط المنخفض تسبِّب خللًا وتطلق عملية غليان، بينما تؤين ذرات السائل على امتداد مسارها، ولجزء من الثانية يتكوَّن مسار من الفقاعات في مكان مرور الجسيمات، والذي يمكن تصويره. ومن شأن الاستعادة الفورية للضغط أن تعيد السائل إلى ما دون درجة الغليان بالكاد، ومن الممكن تكرار العملية بسرعة.

يرتبط عمل غرفة الفقاعات عن كثب بدورة عمل المعجل الذي يزوِّدها بالجسيمات، فالجسيمات تدخل الغرفة حين يكون المكبس مسحوبًا إلى حده الأقصى، ويكون الضغط في أدناه، ويكون السائل في حالة فرط الإحماء، بعد ذلك بنحو واحد مللي ثانية يومض قوس ضوئي، مضيئًا مسارات الفقاعات المتكوِّنة بفعل الجسيمات المشحونة. والتأخير بين درجة الضغط الدنيا والوميض يمكِّن الفقاعات من أن تكبر بصورة كافية بحيث يمكنها الظهور على الصور الفوتوغرافية. في الوقت ذاته، يتحرك المكبس عائدًا في اتجاه

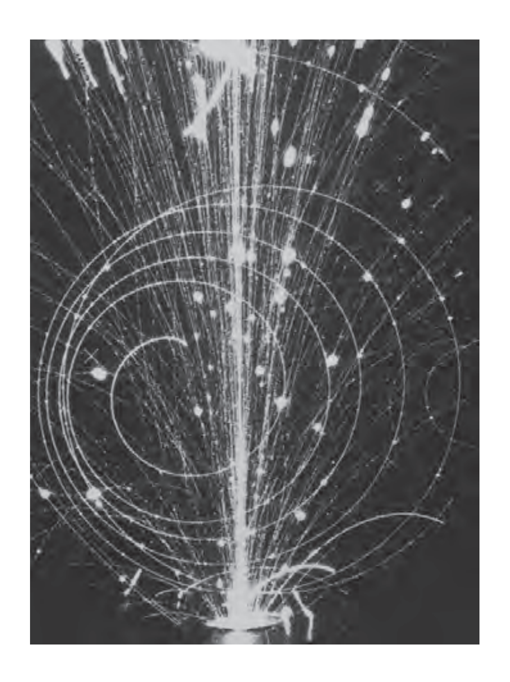


شكل ٦-١: قدمت الأشعة الكونية للفيزيائيين اللمحات الأولى عن الجسيمات دون الذرية، التي خضعت للدراسة لاحقًا بالتفصيل من خلال التجارب في معجلات الجسيمات. تظهر البوزيترونات والميوونات والبايونات والكاوونات في هذه الصورة المأخوذة من غرفة الفقاعات البالغ طولها مترين في مختبر سيرن.[1]

الغرفة، مزيدًا الضغط مجدَّدًا، وينتقل فيلم التصوير أوتوماتيكيًّا إلى الإطار التالي، بعد ذلك تحتاج الغرفة نحو ثانية واحدة حتى «تتعافى» وتكون جاهزة لعملية التمدد التالية. وهكذا تبيِّن غرفة الفقاعات الموضعَ الذي كانت فيه الجسيمات، وهو ما يمكِّننا من دراسة سلوكها على مهل.

في مجال مغناطيسي، سينحني مسار الجسيم المشحون، ويكشف اتجاهه عما إذا كان الجسيم موجب الشحنة أم سالبها، كما سيكشف قطر القوس عن زخمه. وهكذا يمكننا استنتاج كلٍّ من الشحنة والزخم، وإذا علمنا زخم الجسيم وسرعته، يمكننا حساب كتلته ومن ثَمَّ التعرُّف على هويته.

إحدى طرق تحديد السرعة بدقة تستخدم «عدادين» وميضيين ينتجان ومضة من الضوء في كل مرة يمر فيها الجسيم عبرهما، ثم يتم تحويل كل دفقة صغيرة من الضوء



شكل ٦-٢: مسارات العديد من الجسيمات المشحونة تظهر بوضوح في هذه الصورة المأخوذة من التجربة NA35 في سيرن بجنيف. تظهر الجسيمات من تصادم لأيون أكسجين مع نواة ذرة في هدف من مادة الرصاص في الطرف السفلي من الصورة. تكشف الأشرطة الصغيرة الساطعة عن مسارات الجسيمات بينما تمر عبر تأثير مجال مغناطيسي، بحيث تنحني الجسيمات الموجبة في اتجاه، فيما تنحني الجسيمات السالبة في الاتجاه الآخَر. أغلب الجسيمات تتحرك على نحو محموم؛ لذا لا ينحني مسارها إلا قليلًا، لكن على الأقل يكون لجسيم واحد طاقة منخفضة، وهو يلتف حول ذاته عدة مرات في الكاشف، محاكيًا صَدَفة الحلزون.[2]

إلى نبضة كهربية، التي تُضخَّم بعد ذلك لإنتاج إشارة. وبهذه الطريقة، يمكن لعدادين وميضيين أو أكثر أن يكشفا عن مسار حركة الجسيم بينما ينتج ومضات في كل عداد منهما، وبواسطة الزمن المستغرق في الحركة بين العدادين يمكن تحديد سرعة الجسيم المعني.

ومع ذلك، لم تساعد مثل هذه الوسائل في حل لغز التعرُّف على الهوية في حالة الصورة المأخوذة من غرفة الفقاعات، وعادة ما كانت الطريقة الوحيدة هي تعيين هويات مختلفة للمسارات المختلفة، ثم إضافة الطاقة والزخم لكل الجسيمات الناتجة عن التفاعل. وإذا لم تتساوَ هذه القيمة مع القيم المعروفة قبل التفاعل، يكون من المؤكد أن الهويات المفترضة خاطئة، ويجري اختبار هويات أخرى، إلى أن يتم الوصول إلى صورة متسقة. كانت هذه عملية مضيعة للوقت، لكنها كانت أحدث الوسائل الممكنة نحو عام ١٩٦٠. إن تحديد هويات الجسيمات من خلال الحسابات القائمة على المحاولة والخطأ هذه لَهي عملية متكررة تبرع أجهزة الكمبيوتر في القيام بها، واليوم تخلت غرف الفقاعات عن مكانتها لصالح كواشف الإلكترونات التي تتوافق على نحو أفضل مع التحليل الحاسوبي.

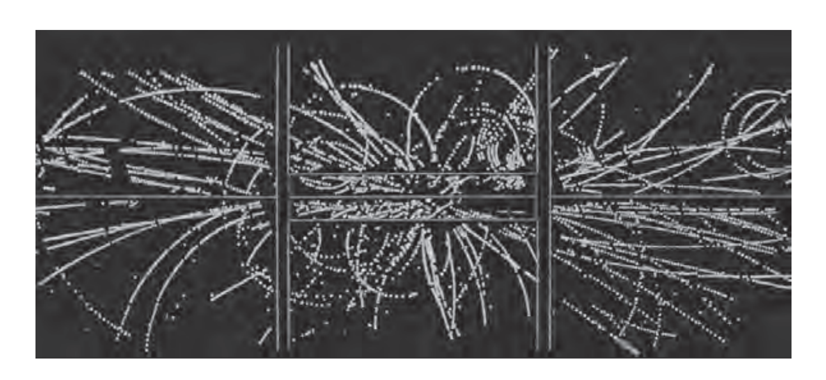
من غرف الفقاعات إلى غرف الشرارات

تستطيع غرفة الفقاعات تقديمَ صورة كاملة عن التفاعل، بَيْدَ أن لها بعضًا من أوجه القصور؛ فهي حساسة فقط حين تكون المحتويات في حالة فرط إحماء، بعد حدوث تمدُّد سريع. ويجب أن تدخل الجسيمات الغرفة في هذه الفترة الحرجة البالغ مدتها بضعة ملي ثوانٍ، قبل أن يعاد الضغط إلى مستواه الطبيعي مجدَّدًا من أجل «تجميد» نمو الفقاعات.

لكن دراسة عدد كبير من التفاعلات النادرة يتطلب أسلوبًا أكثر انتقائية. وفي الستينيات، باتت غرفة الشرارات هي الأسلوب المثالي.

تتكون غرفة الشرارات الأساسية من ألواح معدنية متوازية تفصلها بضعة مليمترات بعضها عن بعض، مغمورة في غاز خامل (أقل تفاعلًا) كالنيون، وحين يمر الجسيم المشحون عبر الغرفة فإنه يخلف مسارًا مؤينًا في الغاز، تمامًا مثل الغرفة السحابية، وما إن يمر الجسيم، يمكنك تمرير جهد كهربي عالٍ بالتناوب في ألواح غرفة الشرارات، وتحت ضغط المجال الكهربي تتكون الشرارات على امتداد المسارات المؤينة. العملية أشبه بحدوث البرق خلال عاصفة كهربية. ومن الممكن تصوير مسارات الشرارات، أو يمكن تسجيل مواضعها من خلال مزامنة وصول الطقطقة المصاحبة لها إلى الميكروفونات الإلكترونية، وفي أي من الحالتين، من الممكن بناء صورة لمسارات الجسيمات من أجل التحليل الحاسوبي اللاحق.

أفضل ما في غرفة الشرارات هو أن لها «ذاكرة»، ومن الممكن التحكم في توقيت بدء عملها. ويمكن استخدام العدادات الوميضية الموضوعة خارج الغرفة، والتي تستجيب بسرعة، من أجل تحديد الموضع الدقيق للجسيمات المشحونة التي تمر عبر الغرفة. وشريطة أن يحدث كل هذا في غضون عُشْر ميكروثانية، فإن الأيونات ستظل موجودة في فراغات غرفة الشرارات، وستكشف الذبذبة ذات الفولتية العالية عن المسارات.



شكل ٦-٣: صورة لواحدة من أولى عمليات رصد البوزون W — الجسيم المشحون الحامل للقوة الضعيفة — ملتقطة في الكاشف UA1 في سيرن عام ١٩٨٢. رصَدَ هذا الكاشف التصادمات المباشِرة بين البروتونات والبروتونات المضادة، والتي في هذه الحالة أتت من اليسار إلى اليمين كي تتصادم في مركز الكاشف. تُظهِر شاشة الكمبيوتر الجزء المركزي من الجهاز، والذي كشف مسارات الجسيمات المشحونة على مدار عملية التأيين التي التقطتها آلاف الأسلاك. كل نقطة على الصورة تتوافق مع سلك قام بتسجيل نبضة تأيين. نتج عن هذه العملية ما يصل إلى ٦٥ مسارًا، واحد منها فقط هو ما كشف عن تحلُّل البوزون W، الذي نتج على نحو لحظي خلال تصادم البروتونات بالبروتونات المضادة. يرجع المسار إلى إلكترون عالي الطاقة. وبجمع طاقات كل الجسيمات الأخرى اكتُشِفَ اختفاء مقدار كبير نسبيًّا من الطاقة في الاتجاه المعاكس لاتجاه الإلكترون، ومن المرجح أن يكون نيوترينو خفي هو ما تسبَّبَ في تبديد هذه الطاقة. معًا، يحمل النيوترينو والإلكترون طاقة مكافئة لكتلة البوزون W القصير الأجل.[2]

بعد ذلك نقسِّم ألواح غرفة الشرارات إلى صفائح من الأسلاك المتوازية، بحيث يفصلها مليمتر أو نحو ذلك عن بعضها. تُستشعَر نبضة التيار المرتبطة بكل شرارة

بواسطة السلك أو السلكين الأقرب للشرارة فقط، وبهذا من خلال تسجيل أي الأسلاك استشعر الشرارات ستعرف في حدود المليمتر الموضع الذي مرَّ منه الجسيم. لاحِظْ كيف يمكِّن هذا غرفةَ الشرارات السلكية من تقديم معلومات جاهزة للتلقيم إلى الكمبيوتر دون أي معالجة إضافية إلا القليل.

تستطيع غرفة الشرارات السلكية أن تعمل أسرع ألف مرة من أغلب غرف الفقاعات، وكانت تتوافق على نحو طيب للغاية مع الطرق الحاسوبية لتسجيل البيانات المطورة في الستينيات. ومن الممكن تلقيم الإشارات الآتية من كواشف عديدة — العدادات الوميضية، الغرف السلكية — إلى جهاز كمبيوتر صغير في الوقت الفعلي لصدورها، بحيث لا يقوم هذا الكمبيوتر بتسجيل هذه المعلومات على شريط مغناطيسي من أجل التحليل المفصل بعد انتهاء التجربة فحسب، وإنما يمكنه أيضًا تقديم المعلومات إلى الفيزيائيين أثناء إجراء التجربة. وتوفِّر مجموعات من الغرف ذات الأسلاك الممتدة في ثلاثة اتجاهات مختلفة معلوماتٍ كافيةً لبناء صورة ثلاثية الأبعاد لمسارات الجسيمات، ويستطيع الكمبيوتر حساب الطاقة والزخم الخاصين بكل جسيم والتحقُّق من هويته.

في الستينيات، مكَّنَتْنا غرف الشرارات من جمع البيانات بسرعة حول تفاعلات بعينها، لكن من ناحية أخرى أمدتنا غرف الفقاعات بصورة أكثر اكتمالًا بكثير عن الأحداث، بما في ذلك نقطة التفاعل، أو «الذروة». كانت الكواشف «الإلكترونية» و«المرئية» يكمل بعضهما بعضًا، ومعًا مكَّنَتْ هذه الكواشف الباحثين من اكتشاف جسيمات لم تكن معروفةً من قبلُ.

غرف الفقاعات الإلكترونية

في معجلات الجسيمات الحديثة يكون عدد التفاعلات كبيرًا للغاية مقارَنَةً بتلك التي كانت موجودةً في أيام غرف الفقاعات، بل حتى غرف الشرارات المبكرة. تتضمن التطوراتُ الحديثة الغرفةَ التناسبية المتعددة الأسلاك وغرفة الحركة، اللتين تعملان على نحو أسرع وأكثر دقةً من غرف الشرارات السلكية. وعلى وجه التحديد، تُستخدَم غرف الحركة بأنواعها المختلفة في تتبُّع الجسيمات المشحونة في كل التجارب المجراة اليوم تقريبًا.

من الظاهر، تبدو الغرفة التناسبية المتعددة الأسلاك مشابِهَةً لغرفة الشرارات؛ إذ تتكون من ثلاثة ألواح من الأسلاك المتوازية الموضوعة داخل هيكل مملوء بالغاز، بَيْدَ أنها تختلف عنها من حيث إن السطح المركزي للأسلاك يمر به على الدوام جهد كهربي

قدره ٥ آلاف فولت، مقارَنةً بالسطحين الآخَرين. تطلق الجسيمات المشحونة سيلًا من إلكترونات التأيين حين تمر عبر الغاز. والغرفة التي يفصل بين أسلاكها مساحة ١-٢ مليمتر تنتج إشارةً في غضون بضعة أجزاء من المائة من الميكروثانية حين يمر بها جسيم، وبمقدورها استيعاب مرور نحو مليون جسيم في الثانية عبر كل سلك، وهو أكبر بألف مرة من غرفة الشرارات.

الجانب السلبي للأمر هو أن تتبُّعَ مسارات الجسيمات داخل حجم كبير، لِنَقُلْ مترًا مكعبًا، سيحتاج إلى عدد كبير للغاية من الأسلاك كل منها مزوَّد بإلكترونيات لتضخيم الإشارات. علاوة على ذلك فإن مقدار الدقة محدود، يتم التغلب على هذه المشكلات بواسطة غرفة الحركة، التي تقوم فكرتها الأساسية على قياس الوقت — وهو ما يمكن عمله بدقة بالغة بالإلكترونيات الحديثة — من أجل الكشف عن المسافة. تتكون الغرفة أيضًا من أسلاك متوازية مشدودة داخل مقدار من الغاز، لكن بعض الأسلاك توفر مجالات كهربية تقسم بدورها الحجم الكبير إلى وحدات أصغر أو «خلايا»، وكل خلية تعمل عمل الكاشف المنفرد، بحيث يوجِّه المجال الكهربي الموجود فيها إلكترونات التأيين من مسار الجسيم المشحون وصولًا إلى سلك «مستشعر» مركزي، والوقت المستغرق كي يصل الإلكترون لهذا السلك يعطي قياسًا طيبًا لمقدار بُعْد المسار عن السلك المستشعر. تستطيع هذه الطريقة تحديد موضع الجسيم في حدود دقة قدرها نحو ٥٠ ميكرومترًا.

ميكروسكوبات السليكون

العديد من الجسيمات العجيبة تعيش لنحو $١٠^{-١٠}$ ثوانٍ فقط، وخلال هذه الفترة الوجيزة ربما تتحرك بسرعة تناهز سرعة الضوء وتقطع بضعة مليمترات. عبر هذه المسافات تخلف الجسيمات آثارًا يمكن قياسها، فالجسيم الذي يحتوي على كوارك ساحر أو آخَر قاعي يعيش في المعتاد لما لا يزيد عن $١٠^{-١٣}$ ثوانٍ، وقد يقطع مسافة ٣٠٠ ميكرومتر وحسب. ولرؤية هذه الجسيمات علينا التأكد من أن جزء الكاشف الأقرب من نقطة الاصطدام لديه أعلى دقة ممكنة. في الوقت الحالي، كل تجربة تقريبًا يكون بها كاشف «ذروة» من السليكون، والذي يمكنه الكشف عن العقد القصيرة التي تتشعب عندها المسارات، بينما تتحلل الجسيمات القصيرة العمر إلى جسيمات أخرى ذات مدى عمري أطول.

حين يمر جسيم مشحون عبر السليكون فإنه يؤين الذرات، محررًا الإلكترونات، ويمكن عندئذٍ للسليكون توصيل الكهرباء. أكثر الطرق شيوعًا باستخدام السليكون يتمثل في تقسيم سطحه خلال عملية التصنيع إلى شرائط رفيعة متوازية تبعد نحو ٢٠ ميكرونًا (جزء على المليون من المتر) بعضها عن بعض، وهذا يوفر دقة قياس لمسارات الجسيمات تتجاوز الـ ١٠ ميكرونات.

صارت كواشف شرائط السليكون هي التقنية المعتد بها في المصادِمات؛ إذ تُعَدُّ بمنزلة «ميكروسكوبات» عالية الدقة تمكننا من النظر داخل أنبوب الحزم، حيث يمكن لذرى تحلل الجسيمات أن تحدث في موضع قريب من نقطة التصادم، وقد أثبتت أهميتها الخاصة في تعيين هوية الجسيمات القاعية، التي تحتوي على الكواركات القاعية الثقيلة. تميل الكواركات القاعية إلى التحلل إلى كواركات ساحرة، التي بدورها تتحلل إلى كواركات غريبة، والجسيمات التي تحتوي على أيٍّ من هذه الكواركات تتحلل في غضون $١٠^{-١٢}$ ثوانٍ، وتنتقل لبضعة مليمترات فحسب، حتى عند إنتاجها في المصادمات الأعلى طاقةً. ومع هذا، تتمكَّن «ميكروسكوبات» السليكون الموضوعة في قلب الكواشف عادةً من تحديد تتابع التحلل بدقة، بدايةً من الكواركات القاعية، مرورًا بالساحرة، وانتهاءً بالغريبة. في التيفاترون بفيرميلاب، لعبت هذه القدرة على «رؤية» الجسيمات القاعية دورًا حاسمًا في اكتشاف الكواركات القمية التي طالما سعى العلماء لاكتشافها، والتي تتحلل إلى كواركات قاعية.

الكشف عن النيوترينوات

من غير المرجح بشدة أن يتفاعل أي نيوترينو منفرد مع المادة داخل أي كاشف، لكن في وجود عدد كافٍ من النيوترينوات، والكواشف الكبيرة، من الممكن اصطياد بعض النيوترينوات. الفكرة الأساسية للكشف عن تلك النيوترينوات النادرة هي استغلال ميلها إلى التحول إلى لبتونات مشحونة كهربيًّا — كالإلكترون — حين تصطدم بالمادة، ووقتها يكون من السهل الكشف عن الإلكترون نظرًا لأنه يملك شحنة كهربية. هذه هي الكيفية التي عرفنا بها الكثير عن النيوترينوات التي تنهمر علينا كل ثانية من الشمس.

حين يمر الضوء عبر مادة ما، على غرار الماء، فإنه ينتقل بسرعة أبطأ مما لو انتقل عبر الفضاء الخاوي؛ لذا رغم أنه ليس بمقدور أي شيء التحرُّك بسرعة تفوق سرعة الضوء في الفراغ، فإنه من الممكن التحرك بسرعة تفوق سرعة الضوء داخل المادة. وحين

يتحرك جسيم ما داخل المادة بسرعة تفوق سرعة الضوء، يمكنه أن يتسبب في موجة اصطدامية من نوعٍ ما تُعرَف باسم إشعاع شيرينكوف. يظهر إشعاع شيرينكوف بزاوية على مسار الجسيم، وكلما عظمت سرعة الجسيم، كبرت الزاوية. تهدف تجربة سوبر كاميوكاندي إلى الكشف عن النيوترينوات حين تتفاعل في الماء إما لتكوين إلكترونات أو ميوونات، اعتمادًا على نوع النيوترينو. هذه الجسيمات — على عكس النيوترينوات — تحمل شحنة كهربية، ولأنها تتحرك بسرعة تفوق سرعة الضوء داخل الماء، فإنها قادرة على إطلاق إشعاع شيرينكوف. وعن طريق التحليل الحريص لأنماط الضوء، يمكننا التمييز بين الميوونات والإلكترونات المتكونة داخل الكاشف، ومن ثَمَّ التمييز بين النيوترينوات الميوونية والنيوترينوات الإلكترونية.

يقع مرصد سادبري للنيوترينوات على عمق ٢٠٧٠ مترًا تحت الأرض في منجم للنيكل في سادبري بأونتاريو، وقلب هذا المرصد وعاءٌ من الأكريليك مملوء بألف طن من «الماء الثقيل»، الديوتريوم، والذي فيه يتحد نيوترون واحد مع البروتون الوحيد المكون لذرة الهيدروجين. في مرصد سادبري تتفاعل النيوترينوات الإلكترونية مع النيوترونات الموجودة في الديوتريوم لإنتاج بروتونات وإلكترونات، وتطلق الإلكترونات السريعة الحركة أقماعًا من إشعاع شيرينكوف بينما تنتقل عبر الماء الثقيل. يكوِّن ضوء شيرينكوف أنماطًا من الحلقات على السطح الداخلي لخزان الماء، تلتقطها آلاف الأنابيب الضوئية المصطفة حول الجدران.

إلا أن السمة الأساسية التي يتسم بها مرصد سادبري للنيوترينوات هو أنه قادر أيضًا على الكشف عن الأنواع الثلاثة من النيوترينوات كلها (انظر الفصل الثامن) من خلال التفاعُل الفريد لكلٍّ منها مع الديوتريوم. إن النيوترينو من أي نوع قادر على شطر ذرة الديوتريوم، محرِّرًا النيوترون، الذي يمكن بعدها لأي نواة أن تستحوذ عليه. تُكتشَف عملية الاستحواذ هذه عندما تتخلص النواة المنتفخة حديثًا بفعل هذا النيوترون، من طاقتها الإضافية عن طريق إطلاق أشعة جاما، التي بدورها تصنع إلكترونًا وبوزيترونًا يخلفان أنماطًا مماثلة لإشعاع شيرينكوف في المياه المحيطة.

بواسطة هذه التجارب أمكن حساب النيوترينوات الآتية من الشمس. وهذه التجارب تؤكِّد على أن الشمس هي بالفعل محرك اندماج نووي. هناك شك منذ وقت بعيد أن هذه هي الطريقة التي تستعر بها النجوم — كالشمس — إلا أن هذا لم يتأكد يقينًا حتى عام ٢٠٠٢.



شكل ٦-٤: الإلكترونات — أو أشعة بيتا — لها كتلة أصغر بكثير من كتلة جسيمات ألفا؛ ومن ثَمَّ فإنها تتحرك بسرعات أعلى بكثير على مستوى الطاقة نفسه. هذا يعني أن الإلكترونات السريعة لا تفقد طاقتها بالسرعة نفسها أثناء تأيين الذرات التي تمر بها. في الصورة نرى المسار المتقطع لإلكترون أشعة بيتا السريع. (المسارات القصيرة السميكة لا تسبِّبها أشعة بيتا، بل إن الأشعة السينية غير المرئية هي التي قذفت بها من ذرات الغاز الذي يملأ الغرفة، ومساراتها أكثر سمكًا لأنها تتحرك على نحو أبطأ من أشعة بيتا؛ ومن ثَمَّ فإنها أكثر تأيينًا للذرات، وهي تتمايل لأنها كثيرًا ما تنزاح إلى الجانب بسبب مرورها بتصادمات مرنة مع الإلكترونات الموجودة في ذرات الغاز.)[3]

الكواشف والمصادمات

أتت الكواشف الإلكترونية بأكثر ثمارها روعة في البيئات التي يستحيل فيها استخدام غرف الفقاعات، في مصادِمات الحزم التي تتلاطم فيها الجسيمات وجهًا لوجه داخل أنبوب حزم.

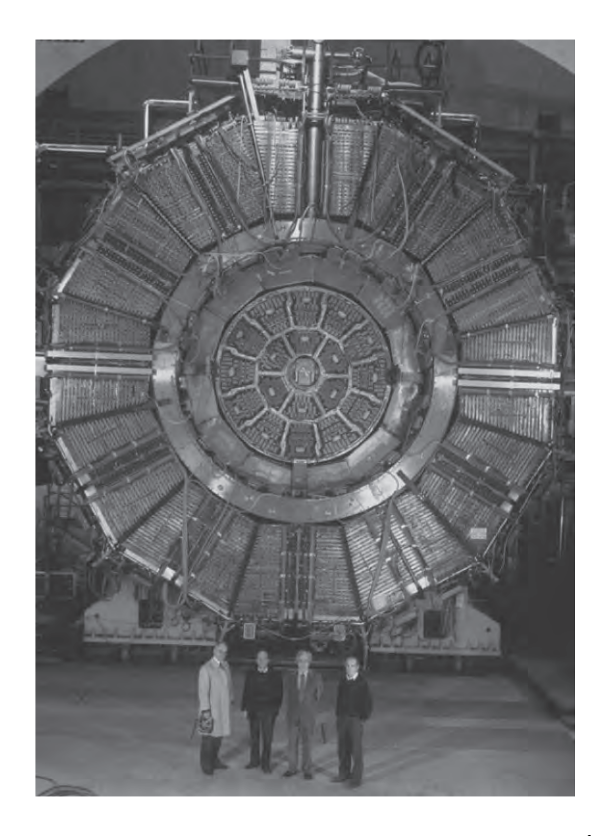
هذه الأجزاء المنفردة مدمجة اليوم داخل كواشف أسطوانية تحيط بنقاط التفاعل في معجلات الجسيمات. يحدث التصادم في المحور المركزي للكاشف، وبينما يندفع الحطام المتطاير فإنه يواجِه سلسلةً من الكواشف المختلفة، وكلٌّ منها له نطاق تخصصه في التعرف على الجسيمات.

في مصادم الهادرونات الكبير تمر مجموعات من الجسيمات بعضها خلال البعض ٤٠ مليون مرة في الثانية الواحدة، وفي كل مرة تتقابل يقع ما يصل إلى ٢٥ تصادمًا؛ أي إن العدد الإجمالي يصل إلى نحو مليار تصادم في الثانية الواحدة. ومعدل تجميع البيانات الناتجة المطلوب من هذه الكواشف يعادِل في حجمه معالجة المعلومات الخاصة بعشرين مكالمة هاتفية متزامنة من قِبَل كل رجل وامرأة وطفل على سطح الأرض.

تُوضَع كواشف ضخمة عند نقاط التصادم، وسيستكشف الكاشفان المسميان «اللولب المركب للميوون» و«أطلس» نطاقَ الطاقة الجديد بحثًا عن كل أنواع التأثيرات الجديدة، المتوقع منها وغير المتوقع. سيكون الكاشف أطلس بارتفاع خمسة طوابق (٢٠ مترًا)، وسيكون قادرًا على قياس مسارات الجسيمات حتى دقة قدرها ٠٫٠١ مليمتر.

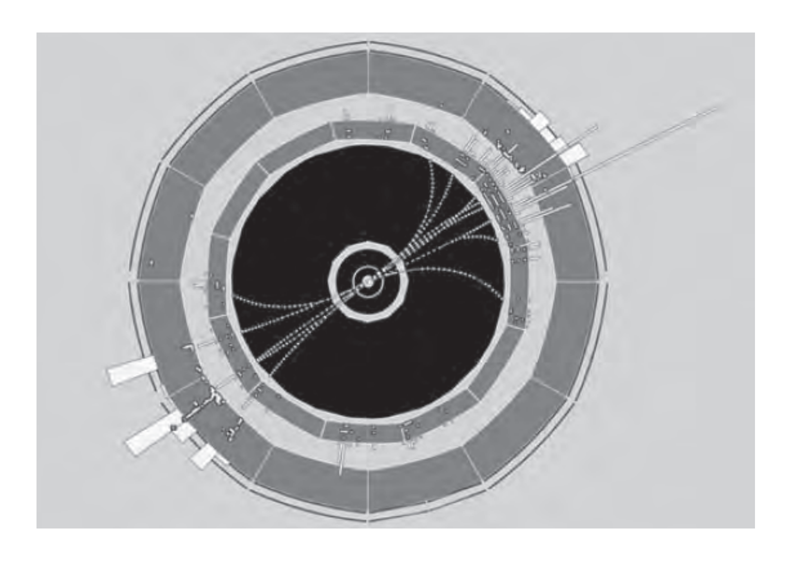
يتبع كلٌّ من «اللولب المركب للميوون» و«أطلس» البناء الراسخ لكواشف الجسيمات الحديثة. أولًا هناك «متتبع المسارات» الذي يحمل اسمًا ملائمًا لوظيفته المتمثلة في تسجيل مواضع الجسيمات المشحونة كهربيًّا حتى دقة قدرها جزء على المائة من المليمتر، وهو ما يمكِّن أجهزة الكمبيوتر من إعادة بناء مسارات الجسيمات، بينما تنحني داخل المجالات المغناطيسية الشديدة. الطبقة الثانية هي مسعِّر مكوَّن من جزأين، وهو مصمَّم لاقتناص كل الطاقة الناتجة عن أنواع عديدة من الجسيمات. أما الجزء الداخلي فهو المسعِّر الكهرومغناطيسي، الذي يحتفظ بطاقات الإلكترونات والفوتونات ويسجلها.

كثيرًا ما يُستخدَم زجاج رصاصيٌّ عالي الجودة — أشبه بالآنية البلورية الموجودة في أدوات المائدة — ككاشف؛ وذلك لأن الرصاص الموجود في الزجاج يجعل الإلكترونات والبوزيترونات تشع فوتونات، وأيضًا يجعل الفوتونات تتحول إلى أزواج من الإلكترونات والبوزيترونات. ويكون التأثير الصافي شلالًا منهمرًا من الإلكترونات والبوزيترونات والفوتونات، والذي يتواصل إلى أن تتشتت طاقة الجسيمات الأصلية كلها. تتحرك الإلكترونات والبوزيترونات في الزجاج بسرعة أكبر من سرعة الضوء، وتشع ضوء شيرينكوف، الذي تلتقطه أنابيب ضوئية. ويحمل مقدار الضوء المجمع دلالةً على مقدار طاقة الجسيمات الأصلية التي دخلت التفاعل.



شكل ٦-٥: أحد الكواشف في مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير وإلى جواره أربعة من العلماء، ويتضح من الصورة حجم الكاشف.[4]

أيضًا هناك آلاف الأطنان من الحديد تتخللها أنابيب مملوءة بالغاز بهدف التقاط البروتونات والبايونات وغير ذلك من الهادرونات؛ تلك الجسيمات المؤلَّفة من كواركات. هذا هو «مسعِّر الهادرونات» الذي يحمل هذا الاسم لأنه يقيس طاقة الهادرونات، مثلما يقيس المسعِّر في مجالات العلم الأخرى الطاقة الحرارية. للحديد الموجود في المسعِّر هدف مزدوج: فعلاوة على إبطاء الهادرونات وحبسها، يشكِّل الحديد جزءًا من المغناطيس

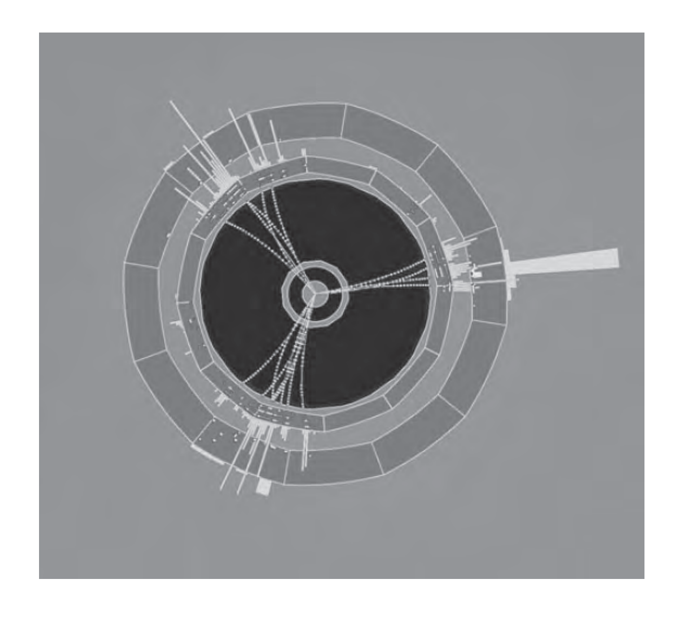


شكل ٦-٦: آثار من الجسيمات والجسيمات المضادة كما تظهر على شاشة الكمبيوتر. قارِن الصورة على شاشة الكمبيوتر بالصورة الفعلية للكاشف في الشكل ٦-٥.[2]

الكهربي المستخدَم في إحناء مسارات الجسيمات المشحونة، وهو ما يكشف عن شحنتها ويساعد في تعيين هويتها.

تتكون الطبقة الخارجية من غرف ميوونات خاصة مهمتها تتبع الميوونات؛ الجسيمات المشحونة الوحيدة القادرة على الاختراق إلى هذا الحد. تشكِّل مجموعة مكونات الكاشف منظومةً متناغمةً مصمَّمةً لقنص أكبر عدد ممكن من الجسيمات بينما تظهر إلى الوجود من التصادم الحادث في المنتصف. نظريًّا، وحدها النيوترينونات المراوغة هي التي يمكنها الهروب من عملية الرصد بشكل كامل، بحيث لا يكون لها أثر على الإطلاق في أي من مكونات الكاشف. بَيْدَ أنه حتى النيوترينونات تخلف أثرًا يدل على وجودها؛ لأنها تفلت من عملية الرصد مستخدِمةً طاقةً وزخمًا، وكلاهما يجب أن يظل محفوظًا في أي تفاعل.

الكاشف بالكامل مصمَّمٌ لتسجيل الحطام الناتج عن التصادمات التي تقع بمعدل مليار مرة في الثانية الواحدة. وفي هذا تقدُّم عظيم مقارَنَةً بالأيام الأولى للغرف السحابية



شكل ٦-٧: نرى هنا نتيجة فناء الإلكترون والبوزيترون، وتظهر بالصورة ثلاث دفقات من الجسيمات. في البداية، أُنتج كوارك وكوارك مضاد، وعلى الفور تقريبًا أطلق أحدهما جلوون. والكوارك والكوارك المضاد والجلوون هي مصادر الدفقات الثلاث من الجسيمات المرصودة.[2]

التي كانت قادِرةً على التسجيل مرة واحدة فقط في الدقيقة، أو حتى غرف الفقاعات التي تسجِّل مرة واحدة كل ثانية. وبين الحطام الناتج عن هذه التصادمات — على طاقاتٍ تتجاوز أي شيء جرى قياسه من قبل في أي معجل جسيمات قائم — تكمن الجائزة في ظاهرةٍ ما غير متوقعة. وكان أعظم الاكتشافات المُعلنة في يوليو من عام ٢٠١٢ اكتشاف بوزون هيجز (الفصل العاشر)، لكن هذا الجسيم، وكتلته ١٢٥ جيجا إلكترون فولت، من المتوقع أن يُنتَج بمعدل جسيم واحد كل ٢٠ مليون مليون تصادم تقريبًا. هذا يعني أنه في ضوء ما يصل إلى المليار تصادُم في الثانية الواحدة، من المفترض أن يظهر بوزون هيجز مرة واحدة في اليوم في كل تجربة يجريها مصادم الهادرونات الكبير. قيل إن العثور على إبرة في كومة من القش أيسر من مشاهدة بوزون هيجز واحد وسط مائة

ألف مليار حَدَث آخَر، وسيمثل التعرف على بوزون هيجز وتسجيل البيانات الخاصة به وحدها على شريط مغناطيسي تحدِّيًا حاسوبيًّا.

كل هذا يوضِّح كيف أن قدرتنا على معرفة أصول المادة وطبيعتها إنما تعتمد على التقدم الحادث على جبهتين: بناء معجلات جسيمات أقوى وأقوى، وتطوير وسائل متقدمة لتسجيل التصادمات.

هوامش

(1) © Goronwy Tudor Jones, University of Birmingham/Science Photo Library.

(2) © CERN/Science Photo Library.

(3) © CTR Wilson/Science Museum/Science & Society Picture Library.

(4) © CERN.

الفصل السابع

قوى الطبيعة

هناك أربع قوى أساسية: الجاذبية والقوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الشديدة والقوة النووية الضعيفة. وسوف نناقش في هذا الفصل الفكرة القائلة بأن ما يتسبَّب في تلك القوى هو تبادل الجسيمات: الفوتونات، وبوزونات W وZ والجلوونات، وأن الطبيعة المختلفة لهذه القوى هي ما يقف خلف كل ما يدور في العالم. فإذا كانت الجسيمات هي أبجدية الطبيعة، فالقوى هي القواعد اللغوية التي تنظمها، كما سنناقش فكرة توحيد القوى.

* * *

تهيمن أربع قوى أساسية على الكون: قوة «الجاذبية» والقوة «الكهرومغناطيسية»، إلى جانب القوة النووية «الشديدة» والقوة النووية «الضعيفة»، اللتين تعملان داخل نواة الذرة وحولها، وهاتان القوتان تعملان عبر مسافات أصغر من حجم الذرة، ومن ثَمَّ فهما ليسا مألوفين لحواسنا التي تستشعر الأشياء الكبيرة الحجم، وذلك مقارنة بتأثيرات الجاذبية والمغناطيسية. ومع ذلك فهاتان القوتان تلعبان دورًا حيويًّا في وجودنا، وتبقيان الشمس متَّقِدَة، وتوفران الدفء الأساسي للحياة.

الجاذبية هي أكثر قوة مألوفة من جانبنا، لكن بين الذرات المنفردة أو الجسيمات المكونة لها، تكون تأثيرات الجاذبية تافهةَ الأثر؛ فقوة الجاذبية بين الجسيمات المنفردة ضئيلة للغاية، وهي تبلغ من الصغر حدًّا يجعلنا نتجاهلها تمامًا في تجارب فيزياء الجسيمات. ولأن قوة الجاذبية تجذب كل شيء تجاه كل شيء آخَر، تتضاعف تأثيراتها وتتراكم إلى أن تصير قوية، وتعمل عبر مسافات فلكية.

تعمل القوى الكهربية وفق القول المعروف: «الأقطاب المتشابهة تتنافر، والمختلفة تتجاذب.» ولهذا، تظل الإلكترونات سالبة الشحنة في مداراتها حول نواة الذرة بفعل قوى الجذب الكهربي تجاه النواة المركزية الموجبة الشحنة.

تتسبَّب الشحنات الكهربية وهي في حالة حركة في التأثيرات المغناطيسية؛ فالقطب الشمالي والجنوبي لقطعة المغناطيس هما تأثيران للحركات الكهربية للذرات وهي تتحرك معًا في تناغم.

القوة الكهرومغناطيسية في جوهرها أقوى من قوة الجاذبية، إلا أن التنافس بين التجاذب والتنافر يتسبَّب في تحييد تأثيرها عبر المسافات البعيدة، وهو ما يفسح المجال أمام الجاذبية كي تكون هي القوة المهيمنة بشكل عام. ومع ذلك، تتسبَّب تأثيرات الشحنات الكهربية المتماوجة في القلب المنصهر للأرض في تسرُّب المجالات المغناطيسية إلى الفضاء. وإبرة المغناطيس التي تشير صوب القطب الشمالي، الذي قد يبعد آلاف الأميال، إنما تفعل هذا بسبب هذا التأثير.

القوة الكهرومغناطيسية هي التي تحافظ على تماسك الذرات والجسيمات معًا، مكوِّنة المادة الكثيفة؛ فأنا وأنت وكل شيء آخَر متماسكون بفضل القوة الكهرومغناطيسية. حين سقطت التفاحة أمام إسحق نيوتن، كانت الجاذبية هي ما تحكم في سقوطها، لكن القوة الكهرومغناطيسية — المسئولة عن صلابة الأرض — هي ما منعتها من مواصلة السقوط صوب مركز الأرض. قد تسقط التفاحة لثوانٍ عدة من ارتفاع كبير، وتعجِّل قوة الجاذبية من سقوطها، لكن حين ترتطم بالأرض فإنها تتوقف وتتهشم في لحظة واحدة، وهذا بفضل القوة الكهرومغناطيسية.

تدبَّرِ المثال التالي كي تحصل على فكرة عن الشدة النسبية للقوتين. في ذرة الهيدروجين يوجد إلكترون سالب الشحنة وبروتون موجب الشحنة، وهما ينجذبان صوب بعضهما بفعل قوة الجاذبية، لكنهما أيضًا يستشعران قوة الجذب الناجمة عن تبايُن شحنتيهما الكهربية. قوة الجذب الكهربية هذه تبلغ من الشدة $١٠^{٤٠}$ مرات قدر قوة الجذب المتبادلة الناجمة عن الجاذبية. للحصول على فكرة عن مدى عِظَم هذا المقدار، تدبَّرْ نصف قطر الكون المنظور: لقد واصَلَ الكون تمدُّده بسرعة تناهز سرعة الضوء؛ أي نحو $١٠^{١٦}$ أمتار في العام، لنحو $١٠^{١٠}$ أعوام منذ الانفجار العظيم؛ لذا يبلغ حجم الكون بأسره على أقصى تقدير نحو $١٠^{٢٥}$ أمتار. يبلغ قطر البروتون المنفرد نحو $١٠^{-١٥}$ أمتار؛ إذن المقدار $١٠^{٤٠}$ يفوق حجم الكون مقارَنَةً بحجم البروتون المنفرد. من الواضح

أنه يمكننا بأمان تجاهُل تأثير الجاذبية على الجسيمات المنفردة في ظل مستويات الطاقة العادية.

يُبقِي تجاذبُ الشحنات المختلفة الإلكتروناتِ في مساراتها الذرية حول النواة الموجبة الشحنة، لكن التنافر بين الشحنات المتشابهة يخلق معضلةً تهدِّد وجودَ النواة ذاته؛ فالنواة مضغوطة بإحكام، وترجع شحنتها الموجبة إلى احتشاد البروتونات المتعددة الموجبة الشحنة داخلها. كيف يمكن لهذه البروتونات، التي تعاني من ذلك التنافر الكهربي الشديد، أن تبقى متماسكة؟

إن قدرتها على البقاء تعطينا دليلًا فوريًّا على وجود قوة جاذبة «شديدة»، تشعر بها البروتونات والنيوترونات، وهي من الشدة بحيث تبقي عليها في مكانها وتمكِّنها من مقاومة قوى التنافر الكهربي. هذه القوة الشديدة إحدى قوتين تعملان داخل نواة الذرة وحولها، وهما تُعرَفان بالقوتين «الشديدة» و«الضعيفة»، وهاتان الصفتان تشيران إلى مقدار قوتهما مقارَنَةً بالقوة الكهرومغناطيسية على المستوى النووي، وهما قوتان قصيرتا المدى، وليسا من القوى التي تألفها حواسنا التي تستشعر الأشياء الكبيرة الحجم، بَيْدَ أن لهما أهمية حاسمة في بقائنا.

إن استقرار أنوية العناصر الذرية يمكن أن يكون توازنًا دقيقًا بين قوى الجذب وقوى التنافر الكهربي المتنافسة. ليس بالإمكان حشد عدد كبير للغاية من البروتونات معًا، وإلا سيتسبب التنافر الكهربي في جعل الذرة غير مستقرة. يمكن أن يكون هذا سببًا لبعض أنواع التحلل الإشعاعي، حيث تنقسم النواة إلى أجزاء أصغر. تستشعر البروتونات والنيوترونات القوة الشديدة على نحو متساوٍ، لكن البروتونات وحدها هي التي تستشعر قوى التنافر الكهربي؛ ولهذا السبب لا تحتوي أنوية العناصر كلها — خلا الهيدروجين — على البروتونات فحسب، وإنما على نيوترونات أيضًا كي تزيد من الاستقرار الإجمالي للقوة الشديدة الجاذبة. على سبيل المثال، يُسمَّى عنصر اليورانيوم ٢٣٥ بهذا الاسم لأنه يملك ٩٢ بروتونًا (وهو ما يحدِّد طبيعته كعنصر اليورانيوم؛ نظرًا لوجود الإلكترونات الـ ٩٢ التي ستجعل الذرة متعادلةً كهربيًّا)، و١٤٣ نيوترونًا، أي ٢٣٥ بروتونًا ونيوترونًا إجمالًا.

هنا قد تتساءل عن السبب الذي يجعل الأنوية تستقبل أي بروتونات على الإطلاق، خاصة وأن زيادة النيوترونات لا تؤدي فيما يبدو إلى عدم استقرار النواة. تعتمد الإجابة على تفاصيل لتأثيرات ميكانيكا الكم تخرج عن نطاق كتابنا هذا، لكن جزءًا كبيرًا من

السبب يرجع إلى الكتلة الإضافية التي يتمتع بها النيوترون مقارنةً بالبروتون. وكما رأينا من قبلُ، فإن هذه الكتلة تخفي تحتها عدم استقرار جوهري يتسم به النيوترون، وبسببه يتحلل النيوترون إلى بروتون ويقذف إلكترونًا، الذي يُسمَّى وقتها جسيم «بيتا» الخاص بـ «نشاط بيتا الإشعاعي».

القوة التي تدمِّر النيوترون هي القوة النووية الضعيفة، وهي تُسمَّى بهذا الاسم لأنها تبدو ضعيفةً مقارَنَةً بالقوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الشديدة في درجة حرارة الغرفة. تقلقل القوة الضعيفة النيوترونات والبروتونات، بحيث تتسبب في جعل نواةِ أحدِ العناصر الذرية تتحوَّل إلى نواةٍ لعنصر آخَر من خلال نشاط بيتا الإشعاعي. وهي تلعب دورًا مهمًّا في المساعدة على تحويل البروتونات — أساس وقود الهيدروجين الموجود بالشمس — إلى هليوم (وهي العملية التي تنطلق بموجبها طاقة، وتظهر هذه الطاقة في نهاية المطاف على صورة أشعة الشمس).

تتسبَّب قوى الجاذبية بين البروتونات الوفيرة داخل الشمس في جعلها تنجذب إلى الداخل إلى أن تتلامس تقريبًا، وأحيانًا يتحرك بروتونان بسرعة كبيرة بما يكفي بحيث يتغلَّبان على التنافر الكهربي بينهما لوقت وجيز، ويصطدم أحدهما بالآخَر. تحوِّل القوةُ الضعيفة البروتونَ إلى نيوترون، ثم تُبقِي القوة الشديدة هذه النيوترونات والبروتونات معًا، بحيث تُكوِّن أنويةَ عنصرِ الهليوم. تنطلق الطاقة وتُشع بفضل القوة الكهرومغناطيسية. إن وجود هذه القوى الأربع وسماتها وشدتها المتباينة هو ما يجعل الشمس تستعر بالمعدل الملائم لحياة البشر.

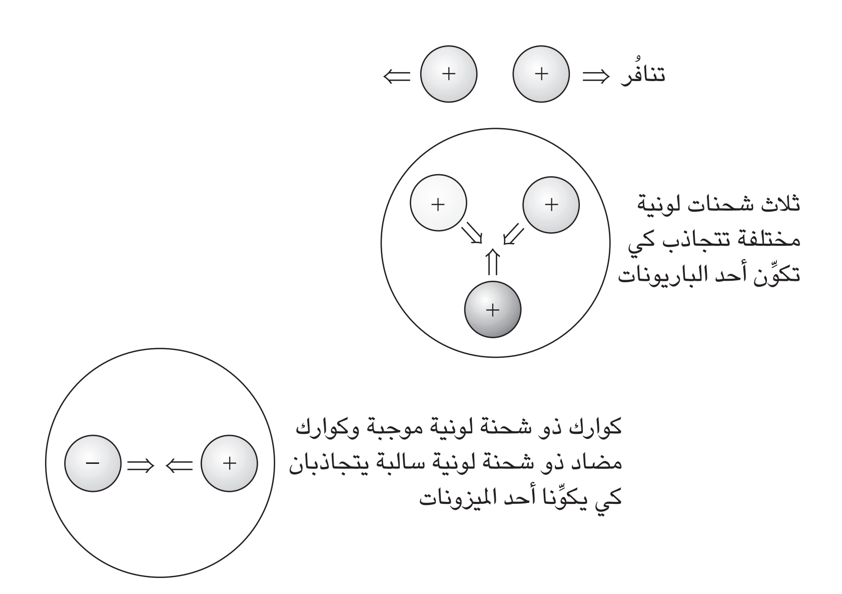
في المادة العادية، تعمل القوى الشديدة فقط داخل نواة الذرة، وهي بالأساس ناتجة عن وجود الكواركات، الجسيمات الأساسية النهائية التي منها تتكون البروتونات والنيوترونات. وكما أن القوة الكهربية والقوة المغناطيسية ما هي إلا تأثيرات تنشأ عن شحنات كهربية، تنشأ القوة الشديدة في نهاية المطاف عن نوع جديد من الشحنات تحمله الكواركات وحدها وليس اللبتونات؛ ومن ثَمَّ فإن اللبتونات، كالإلكترون، لا تستشعر القوة الشديدة، لكن على العكس، الجسيمات المؤلفة من كواركات — على غرار البروتون والنيوترون — تستشعر القوة الشديدة.

القوانين التي تحكم هذا الأمر مشابِهة في أساسها لتلك التي تحكم القوة الكهرومغناطيسية؛ فالكواركات تحمل الشحنة الجديدة فيما يمكن أن نعرِّفه على أنه الصورة الموجبة، وبالمثل تحمل الكواركات المضادة المقدار نفسه من الشحنة، لكنها

شحنة سالبة. وقوة الجذب بين الكوارك والكوارك المضاد هي التي تُبقِي عليهما متحدين معًا؛ ومن هذا جاءت حالات اقتران الكواركات بالكواركات المضادة التي نطلق عليها اسم الميزونات. لكن كيف تتكون الباريونات، التي تتألف من ثلاثة كواركات؟

يتبيَّن لنا أن هناك ثلاثة أنواع متمايزة من الشحنة الشديدة، وللتمييز بينها سنسميها بالألوان الأحمر والأزرق والأخضر؛ ومن ثَمَّ فقد صارت هذه الشحنات تُعرَف باسم الشحنات اللونية، رغم أنه لا علاقة لها بالألوان التي تألفها أعيننا، فما هذه إلا مجرد تسميات. ومثلما تتجاذب الألوان المختلفة، تتنافر الألوان المتشابهة، ومن ثَمَّ فإن أي كواركين يحملان الشحنة اللونية عينها — الحمراء مثلًا — سيتنافران، لكن لو أن أحدهما يحمل شحنةً خضراء والثاني شحنةً حمراء فإنهما سيتجاذبان، والأمر عينه ينطبق على الثلاثة كواركات التي تحمل الشحنات اللونية الثلاث المختلفة، الحمراء والزرقاء والخضراء. وإذا اقترب كوارك رابع من هذا الثلاثي فسينجذب إلى اثنين من الكواركات لكنه سيتنافر مع الثالث، الذي يحمل الشحنة اللونية عينها. يتضح أن هذا التنافر يوازن قوة الجذب الصافية، بحيث يظل الكوارك الرابع في حالة حبيسة، لكنه إذا عثر على كواركين آخَرين يحمل كلٌّ منهما شحنةً لونيةً تختلف عن شحنته، يكون بمقدور هذا الثلاثي أن يلتحم معًا هو الآخَر. وهكذا نبدأ في رؤية أن قوى الجذب لهذه الثلاثيات — كما الحال عند تكوُّن البروتونات والنيوترونات — تنتج عن الطبيعة الثلاثية للشحنات اللونية. ومثلما يؤدي وجود الشحنات الكهربية داخل الذرات إلى تجمُّعها معًا لتكوين الجزيئات، تؤدي الشحنات اللونية داخل البروتونات والنيوترونات إلى تجمُّعها معًا لتكوين ما يُعرَف لنا باسم النواة.

إن التشابه الكامن في قواعد التجاذب والتنافر يؤدي إلى تشابه السلوك بين القوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الشديدة على مسافات أصغر كثيرًا من حجم البروتون أو النيوترون المنفرد، إلا أن الثراء المضاعَف ثلاث مرات الذي تملكه الشحنات اللونية الموجبة أو السالبة مقارَنَةً بنظيرتها الكهربية الأحادية، يؤدي إلى سلوك مختلف في هذه القوى على مسافات أكبر. تتشبع القوى المولَّدَة عن طريق الشحنات اللونية على مسافات تُقدَّر بنحو $١٠^{-١٥}$ أمتار، وهو الحجم التقليدي للبروتون أو النيوترون، وتكون قوية للغاية على هذه المسافات، لكن فقط ما دام الجسيمان متلاصقين — أي «يمس» أحدهما الآخَر مجازًا — في حدود هذه المسافة، ومن ثَمَّ فالقوى التي تحدثها الشحنات اللونية لا تعمل إلا عبر الأبعاد النووية. على النقيض من ذلك، تعمل القوة الكهرومغناطيسية



شكل ٧-١: قواعد التجاذب والتنافر للشحنات اللونية. الشحنات اللونية المتشابهة تتنافر، بينما الشحنات المختلفة تتجاذب. تتجاذب الكواركات الثلاثة — التي يحمل كلٌّ منها شحنة لونية مختلفة — بعضها إلى البعض كي تكوِّن أحد الباريونات. يحمل الكوارك والكوارك المضاد شحنتين مختلفتين، ويمكنهما التجاذب كي يكوِّنا أحد الميزونات.

عبر الأبعاد الذرية التي تصل إلى مسافة ١٠^-١٠ أمتار عند بناء الذرات المستقرة، بل من الممكن استشعارها عبر المسافات الكبيرة، كما الحال في المجالات المغناطيسية المحيطة بالأرض.

هذا يأخذنا على نحو طبيعي إلى التساؤل عن الكيفية التي تَبسُط بها هذه القوى تأثيراتها عبر الفضاء.

حاملات القوى

كيف يتسنَّى للقوى، على غرار القوة الكهرومغناطيسية، أن تبسط تأثيراتها عبر الفضاء؟ كيف يتمكَّن بروتون وحيد من أن يُوقِع الإلكترون في حبائله وهو يبعد عنه ١٠^-١٠

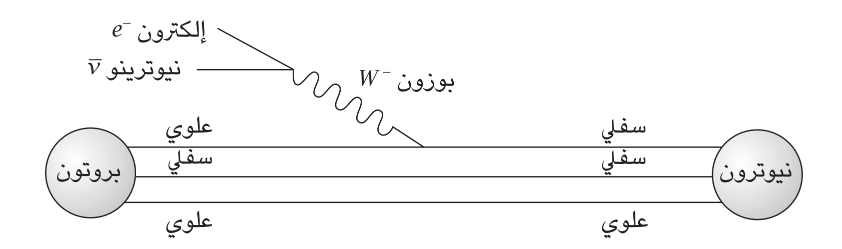
أمتار، بحيث يكوِّنا ذرة هيدروجين؟ تقضي نظرية الكم بأن هذا يتم من خلال عوامل وسيطة، من خلال عملية تبادل للجسيمات. في حالة القوى الكهرومغناطيسية يتم تبادل الفوتونات، الحزم الكمومية للإشعاع الكهرومغناطيسي، كالضوء.

الشحنات الكهربية قادرة على إطلاق الإشعاع الكهرومغناطيسي أو امتصاصه، والأمر عينه ينسحب على جسيماته الوسيطة؛ الفوتونات، وعلى نحو مشابه تستطيع الشحنات اللونية إطلاق نوع من الإشعاع وامتصاصه، وجسيمات هذا الإشعاع الوسيطة يُطلَق عليها اسم «الجلوونات»، وهذه الجلوونات هي التي تُبقِي على الكواركات ملتصقةً بعضها ببعض كي تكوِّن البروتونات والنيوترونات والأنوية الذرية. وبالمثل، تُعرَف ناقلات القوة النووية الضعيفة باسم البوزون W والبوزون Z.

تختلف بوزونات W عن الفوتونات في وجهين مهمين: أن لها شحنة كهربية، وأن لها كتلة ضخمة. شحنتها الكهربية تجعلها تسرِّب قدرًا من الشحنة بعيدًا عن المصدر، ولهذا يتحوَّل النيوترون المتعادل إلى بروتون موجب الشحنة حين ينبعث منه بوزون W^-، ومصدر تحلُّل بيتا للنيوترونات هو تحوُّل البوزون W^- إلى إلكترون ونيوترينو. تبلغ كتلة البوزون W نحو ٨٠ مرة قدر كتلة البروتون أو النيوترون. ولو كنتَ تجلس في سيارة وزنها طن واحد ثم اندفع منها ٨٠ طنًّا، فستشكو قائلًا إن ثمة شيئًا خاطئًا هنا! لكن في العالم الكمي هذا النوع من التفاعل يمكن أن يقع. ومع ذلك، هذا الخرق لتوازن الطاقة سريع الزوال، ومحدود من حيث الزمن، بحيث إن نتاج عدم التوازن هذا، دلتا إي (ΔE)، والزمن الذي يستغرقه، دلتا تي (Δt)، لا يمكنهما تجاوز ثابت بلانك h، أو من الناحية العددية $\Delta E \times \Delta t <$ ٦ × ١٠^-٢٥^ جيجا إلكترون فولت في الثانية. وهذا الاقتصار أحد صور «قانون عدم اليقين لهايزنبرج».

هذا يعني أنه لكل ثانية يمكنك أن تُفْرِط في سحب طاقة ذات مقدار تافه يبلغ ١٠^-٢٥^ جيجا إلكترون فولت، أو «تستعيرها». و«استعارة» ٨٠ جيجا إلكترون فولت (الحد الأدنى من الطاقة لتكوين بوزون W واحد) يمكن أن يحدث لمدة تبلغ نحو ١٠^-٢٤^ ثوانٍ، وهو وقت ضئيل للغاية لا يستطيع حتى الضوء أن يتحرك فيه لأكثر من عُشْر المسافة عبر البروتون؛ ومن ثَمَّ فإن المسافة التي يستطيع البوزون W أن ينقل عبرها القوة أقلَّ بكثير من مساحة البروتون الواحد. إذن الطبيعة القصيرة المدى للقوة الضعيفة إنما ترجع إلى الكتلة البالغة الضخامة للجسيم الحامل لهذه القوة، لكن هذا لا يعني أن هذه القوة توجد فقط في نطاق مسافة محدودة ثم تنطفئ بغتة، بل هي تذوي وتقل

شدتها على نحو بالغ على امتداد مسافات بحجم البروتون. وعلى مثل هذه المسافات يتجسد تحلُّل بيتا، ومن هنا جاءت تسمية هذه القوة باسم القوة «الضعيفة».



شكل ٧-٢: تحلل بيتا عن طريق البوزون W: يتحول النيوترون إلى بروتون عن طريق إطلاق بوزون W، الذي يتحوَّل بعد ذلك إلى إلكترون ونيوترينو.

عام ١٨٦٤ نجح جيمس كلارك ماكسويل في توحيد ظاهرتي الكهرباء والمغناطيسية المنفصلتين، فيما نعرفه اليوم باسم الكهرومغناطيسية. بعدها بقرن واحد نجح جلاشو وعبد السلام وواينبرج في توحيد القوة الكهرومغناطيسية مع القوة الضعيفة فيما صار يُعرَف باسم نظرية القوة الكهروضعيفة، وقد فسرت هذه النظرية الضعفَ الظاهريَّ للمكون «الضعيف» لهذه القوة الموحَّدَة، بوصفه ناتجًا عن الكتلة الضخمة للبوزون W، على عكس فوتون القوة الكهرومغناطيسية العديم الكتلة. ومن شأن نظريتهم أن تنجح فقط في حالة وجود الجسيمين المشحونين W^+ وW^-، إضافة إلى شريك ثقيل هو البوزون Z^0 الذي يملك كتلةً قدرها ٩٠ جيجا إلكترون فولت. كما تقضي نظريتهم بأننا لو تمكَّنَّا من توفير الطاقة الكافية، حتى نطاق ١٠٠ جيجا إلكترون فولت أو أكثر — بحيث يمكن إنتاج البوزون W والبوزون Z على نحو مباشر في المختبر — فسيكون بمقدورنا رؤية أن القوة الضعيفة لها شدة تماثِل شدة القوة الكهرومغناطيسية، وأنها لم تَعُدْ بمثل هذا الضعف. وقد أُجرِيت هذه التجارب بالفعل وأكَّدَتْ هذه الظاهرة.

اكتُشِف البوزونان W وZ في سيرن عامي ١٩٨٣ و١٩٨٤، حيث ظهرا على نحو وجيز بين الحطام المتخلف عن تصادمات مباشِرة بين البروتونات والبروتونات المضادة. مثل هذه التصادمات تنتج أعدادًا كبيرة من البايونات، ونادرًا ما ينتج بوزون W أو Z

منفرد. أدى هذا إلى تخصيص معجل كامل — مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير الذي تفني فيه حِزَمُ الإلكترونات والبوزيترونات المتصادمة بعضها ببعض — لهذا الغرض بعد ضبطه على طاقة إجمالية قدرها ٩٠ جيجا إلكترون فولت، هذه الطاقة تعادل طاقة البوزون Z عند السكون، وبهذا تمكَّن مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير من إنتاج هذه الجسيمات على نحو نظيف. وعلى مدار عقد كامل من التجارب، جرى إنتاج أكثر من ١٠ ملايين من بوزونات Z ودراستها. وقد أثبتت هذه التجارب أن مفهوم دمج القوة الكهرومغناطيسية والقوة الضعيفة في قوة واحدة كهروضعيفة كان مفهومًا صحيحًا. إن الكتل الضخمة للبوزونات W وZ هي التي سبَّبَتْ هذا الضعف الظاهري حين كانت مستخدمة في التجارب الماضية، عند طاقات أدنى بكثير من المائة جيجا إلكترون فولت، كما في نشاط بيتا الإشعاعي.

جدول ٧-١: الشدة النسبية لمختلف القوى عند عملها على الجسيمات الأساسية في طاقات منخفضة مماثلة لدرجة حرارة الغرفة. على طاقات أعلى من ١٠٠ جيجا إلكترون فولت، تصير شدةُ القوتين الكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة متشابهتين. يُظهر الجدولُ الجسيماتِ الحاملةَ للقوى وهي: الجلوون والفوتون والجرافيتون — وجميعها عديم الكتلة — إضافةً إلى البوزونات W^+ وW^- وZ^0 الضخمة الكتلة. أيضًا يُظهِر الجدول أمثلةً على الكيانات ذات الصلة الخاصة بالقوة المختلفة.

القوة	الشدة	الحامل	أمثلة
الشديدة	١	الجلوونات	نواة الذرة
الكهرومغناطيسية	~١٠^{-٢}	الفوتون	الذرات
الضعيفة	~١٠^{-٥}	البوزونات W^+ وW^- وZ^0	النيوترينو
الجاذبية	~١٠^{-٤٢}	الجرافيتون	المجرات، الكواكب

وأخيرًا، لدينا القوة النووية الشديدة، التي منشؤها الشحنات اللونية التي تحملها الكواركات والكواركات المضادة، في هذه الحالة يتم نقل القوة بواسطة «الجلوونات». بما أن الكوارك يمكن أن يأخذ أيًّا من الشحنات اللونية الثلاث، الحمراء والخضراء والزرقاء، فإن الجلوون المنبعث منه يمكن هو نفسه أن يحمل شحنة لونية. على سبيل المثال، الكوارك ذو الشحنة اللونية الحمراء يمكن أن ينتهي به المطاف وهو يحمل شحنةً زرقاء،

لو كان الجلوون يحمل شحنة على غرار «أحمر موجب، أزرق سالب»، وتسمح النظرية الكمية النسبوية المعروفة باسم الديناميكا اللونية الكمية بثمانية ألوان مختلفة إجمالًا للجلوونات.

بما أن الجلوونات تحمل شحنات لونية، بإمكانها أن تتجاذب وتتنافر فيما بينها بينما تنتقل عبر الفضاء، وهذا على عكس حالة الفوتونات التي تنقل القوة الكهرومغناطيسية؛ فالفوتونات لا تحمل هي نفسها شحنةً (كهربية)، ومن ثَمَّ فإنها لا تتأثر بالقوى الكهرومغناطيسية فيما بينها. تستطيع الفوتونات الانتقال عبر الفضاء على نحو مستقل، بحيث تملأ الفراغ كله، وتتناقص شدة القوة بالتناسب مع مربع سرعة المسافة التي تقطعها، حسب «قانون التربيع العكسي» الشهير لعلم الكهرباء الساكنة. تحمل الجلوونات شحنات لونية، ولا تملأ الفضاء كما تفعل الفوتونات. وتتسبب تفاعلاتها المتبادلة في جعل القوة الناتجة مركَّزةً في خط مستقيم، على امتداد محور الاتصال بين الكواركين الملونين.

لذا، بينما تملأ الفوتونات الفضاء وتتحرك على نحو مستقل، فإن الجلوونات تتجمع. ومن تبعات ذلك التجمُّع إمكانية أن تتجاذب الجلوونات فيما بينها لتكون حالات مركبة قصيرة العمر تُعرَف باسم كرات الغراء، وهذا التجاذب المتبادل بين الجلوونات أثناء نقلها القوة هو الذي يجعل السلوكيات الطويلة المدى للقوة الكهرومغناطيسية والقوة اللونية (الشديدة) تختلف اختلافًا جذريًّا. تذوي القوة الكهرومغناطيسية بالتناسب مع مربع المسافة المقطوعة، بينما القوى اللونية لا يحدث لها ذلك، فالطاقة المطلوبة للفصل بين مصدرين من المصادر اللونية — الكواركات مثلًا — تتزايد بالتناسب مع المسافة بينهما، وعند مسافة انفصال قدرها نحو ١٠^{−١٥} أمتار، تصير هذه القوة لانهائية؛ وبهذا يستحيل فصل أي كوارك عن رفاقه، بل تظل الكواركات مجتمعة في ثلاثيات، كالباريونات، أو في أزواج من الكوارك والكوارك المضاد كما الحال في الميزونات. ومن هذا المنطلق صارت تأثيرات الشحنات اللونية تُوصَف بأنها «شديدة» عبر المسافات الكبيرة.

لكن على المسافات القصيرة، كما أظهرت التجارب العالية الطاقة، تبدو القوة الكهروضعيفة والقوة اللونية وكأنهما تظهران نوعًا من التوحُّد الإجمالي. فقط عند الطاقات المنخفضة، كما كان المعتاد حتى نهاية القرن العشرين، تظهر الخصائص المتباينة لهاتين القوتين: البوزونات W وZ الضخمة تسبِّب الضعف الظاهري، وعلى النقيض من ذلك تتسبَّب التفاعلات المتبادلة بين الجلوونات في جعل القوى اللونية بهذه الشدة العظيمة.

هذا ما نعرفه بالفعل، وإذا استكشفنا تأثيرات القوة اللونية والقوة الضعيفة والقوة الكهرومغناطيسية على طاقات قصوى، أبعد بكثير عما يمكننا قياسه في المختبر، فستبدو هذه القوى الثلاث متشابهة. وسلوك الجسيمات الذرية على الطاقات العالية، كتلك التي كانت وفيرة بُعَيْد الانفجار العظيم، يوحي بأن القوى اللونية قد ضعفت، وأنها تشبه في شدتها القوة الكهرومغناطيسية المألوفة. وقد ظهرت بوادر لتوحيد القوى بالفعل، تُعرَف بنظرية التوحيد العظمى للقوى، وهذه النظرية تقترح أن ثمة بساطة ووحدة كامنة في قلب الطبيعة، وأن ما لمحناه من الطبيعة حتى الآن ما هو إلا بقايا باردة غير متناظرة لهذه الحالة الأصلية. لكن سيتُرَك الفصلُ للتجارب المستقبلية لمعرفة مدى صحة هذه النظرة من عدمها.

الفصل الثامن

المادة العجيبة (والمادة المضادة)

للطبيعة منظومة ثلاثية الأطراف، أو «أجيال». سننظر في هذا الفصل إلى المادة المضادة، وإلى لغز وجود قدر قليل للغاية منها، كما سنلقي نظرةً على التناظر بين الأجيال التي تظهر فعليًّا وكأنها متطابقة لولا تبايُن كتلتها، كما سنستعرض الأفكار التي تقضي بأن تعدُّد الأجيال قد يكون له علاقة باختفاء المادة المضادة، وسنستعرض التجارب التي تحاول معرفة ما إذا كان هذا صحيحًا أم لا، وفي النهاية سنلقي نظرة على المادة الغريبة.

* * *

الغرابة

قابلنا بالفعل الجسيمات الأساسية التي تتألف منها المادة الموجودة على الأرض، إلا أن مخطَّط الطبيعة يحوي ما هو أكثر من هذا. تضربنا الأشعة الكونية الآتية من الفضاء الخارجي على نحو متواصل، وهذه الأشعة تتكون من أنوية العناصر التي أُنتِجت في النجوم وفي الأحداث الكارثية في الأماكن الأخرى من الكون، وهذه الجسيمات تندفع عبر الفضاء وبعضها تقتنصه المجالات المغناطيسية للأرض، ومن ثَمَّ يضرب الطبقات العليا من الغلاف الجوي منتجًا وابلًا من الجسيمات الثانوية. في أربعينيات القرن العشرين وخمسينياته، مثَّلَتِ الأشعة الكونية مصدرًا نَشِطًا لاكتشاف أشكال المادة التي لم تكن معروفة بعدُ على الأرض، بعض هذه الأشكال لها خواص غير معتادة وصارت تُعرَف بالجسيمات «الغريبة»، واليوم بتنا نعرف ما يميِّز هذه الجسيمات عن البروتونات

والنيوترونات والبايونات المألوفة: أنها تحتوي على نوع جديد من الكواركات، نوع صار يُعرَف باسم «الكوارك الغريب».

هناك باريونات غريبة وميزونات غريبة. تتكون الباريونات الغريبة من ثلاثة كواركات يكون أحدها على الأقل كواركًا غريبًا، وكلما زاد عدد ما يحويه الباريون من كواركات غريبة، زادت درجة «غرابته». يتكون الميزون من كوارك وكوارك مضاد، وبناءً عليه يكون الميزون الغريب هو ذلك الذي يحتوي إما على كوارك غريب أو على كوارك غريب مضاد. جاء اكتشاف الجسيمات الغريبة قبل اكتشاف أن الباريونات والميزونات مكوَّنة من كواركات بسنوات عديدة، وقد أدت خصائص مجموعة من الجسيمات الغريبة بالمُنظِّرين إلى ابتكار مصطلح الغرابة، الذي يحمل في كثير من جوانبه شبهًا بالشحنة؛ إذ إن الغرابة تُحفَظ عندما تؤثِّر القوة الشديدة على الجسيمات، وبذلك أصبح بوسعنا تفسير أي العمليات مفضَّل وأيها غير مفضل، بواسطة حساب مقدار الغرابة التي يملكها كل جسيم من الجسيمات المشاركة. وقد تحدد أن الميزونات المختلفة تحمل غرابة مقدارها +١ أو −١، أما الباريونات الغريبة فقد وُجِد وفق هذا النظام أنها تحمل غرابة مقدارها −١ أو −٢ أو −٣. وقد صرنا اليوم نفهم ما يحدِّد ذلك؛ فمقدار الغرابة «السالبة» التي يحملها جسيم ما يتناسب مع عدد الكواركات الغريبة الموجودة داخله. ربما كان من الملائم أكثر لو أننا قسنا مقدار الغرابة استنادًا إلى أن كل كوارك غريب يحمل وحدة واحدة من الغرابة الموجبة، لكنه ليس كذلك؛ ولهذا نحن ملتزمون بهذه المصادفة التاريخية التي وفقًا لها يترجم عدد الكواركات الغريبة إلى غرابة سالبة، فيما يترجم عدد الكواركات الغريبة المضادة إلى غرابة موجبة. (وقد تسبَّبت مصادفة تاريخية مشابهة في الشحنة السالبة للإلكترون.)

جدول ٨-١: باريونات ذات لف مغزلي ١ / ٢.

باريون	الكواركات	الشحنة	الغرابة	الطاقة المكافئة للكتلة (ميجا إلكترون فولت)
بروتون	علوي علوي سفلي	+١	٠	٩٣٨
نيوترون	سفلي سفلي علوي	٠	٠	٩٤٠
لامدا Λ	علوي سفلي غريب	٠	−١	١١١٥
سيجما Σ^+	علوي علوي غريب	+١	−١	١١٨٩

باريون	الكواركات	الشحنة	الغرابة	الطاقة المكافئة للكتلة (ميجا إلكترون فولت)
سيجما Σ^0	علوي سفلي غريب	٠	−١	١١٩٢
سيجما Σ^-	سفلي سفلي غريب	−١	−١	١١٩٧
زي Ξ^0	علوي غريب غريب	٠	−٢	١٣١٥
زي Ξ^-	سفلي غريب غريب	−١	−٢	١٣٢١

الكوارك الغريب يحمل شحنة كهربية مقدارها −١ / ٣، تمامًا مثل الكوارك السفلي، وهو أثقل من الكوارك السفلي بإجمالي طاقة مكافئة لكتلته قدرها نحو ١٥٠ ميجا إلكترون فولت، لكن من حيث كل الجوانب الأخرى يبدو الكوارك الغريب والكوارك السفلي متماثلين، وبسبب الكتلة الأثقل للكوارك الغريب مقارَنةً بالكوارك العلوي أو السفلي، في كل مرة يحل كوارك غريب محل كوارك علوي أو سفلي داخل البروتون أو النيوترون يكون الباريون الناتج أثقل بنحو ١٥٠ ميجا إلكترون فولت لكل وحدة من الغرابة (السالبة).

جدول ٨-٢: باريونات ذات لف مغزلي ٣ / ٢.

تجاوبات الباريونات	الكواركات	الغرابة	الطاقة المكافئة للكتلة (ميجا إلكترون فولت)
دلتا Δ^-	سفلي سفلي سفلي	٠	١٢٣٢
سيجما $\Sigma^{\star+}$	سفلي سفلي غريب	−١	١٣٨٠
زي $\Xi^{\star-}$	سفلي غريب غريب	−٢	١٥٣٠
أوميجا Ω^-	غريب غريب غريب	−٣	١٦٧٠

يُظهِر (الجدول ٨-١) الباريونات الشبيهة بالبروتونات والنيوترونات، والتي لها لف مغزلي قدره ١ / ٢، إلى جانب شحناتها الكهربية وغرابتها ومقدار كتلتها (طاقتها

المكافئة بالميجا إلكترون فولت). ليست القاعدة دقيقة تمامًا لكنها على الأقل صحيحة من الناحية النوعية (الكتل الفعلية، كما كان الحال مع البروتون والنيوترون، تعتمد أيضًا على القوى الكهربية المختلفة العاملة بين مكونات الجسيم، وعلى حقيقة أن أحجام الجسيمات التي تقارب نحو ١٠^{−١٥} أمتار، ليست كلها متماثلة، وذلك بفضل الطبيعة المعقَّدَة للقوى المؤثرة عليها). تتحقق القاعدة بصورة أكثر دقة في مجموعة الباريونات الغريبة ذات اللف المغزلي ٣ / ٢ التي تتشارك التجاوب Δ، كما يظهر في (الجدول ٨-٢).

هناك أيضًا ميزونات ذات غرابة مقدارها +١، على غرار الكاوون $K^+(u\overline{s})$ أو الكاوون $K^0(d\overline{s})$، وأخرى ذات غرابة مقدارها −١ على غرار الكاوون المضاد $K^-(s\overline{u})$ والكاوون المضاد $\overline{K}^0(s\overline{d})$، والتي تحمل طاقةً مكافئةً قدرها نحو ٥٠٠ ميجا إلكترون فولت. هناك أيضًا ميزونات تحتوي على كوارك غريب وكوارك غريب مضاد، ومن ثَمَّ لا تكون هناك أي غرابة إجمالية. هذه التركيبة من الكوارك الغريب والكوارك الغريب المضاد ($s\overline{s}$) تؤدي إلى ميزون ثالث متعادل الشحنة الكهربية، يُعرَف باسم جسيم إيتا الأولي η' وذلك إضافةً إلى الميزون باي π^0 والميزون إيتا η متعادلي الشحنة الكهربية اللذين قابلناهما في الفصل الرابع.

هذه الميزونات مكوَّنة من كوارك وكوارك مضاد بإجمالي لف مغزلي قدره صفر. هناك أيضًا مجموعة يكون فيها إجمالي اللف المغزلي للكوارك والكوارك المضاد واحدًا، والجسيمات الغريبة التي ينطبق عليها هذا الوصف تُعرَف باسم الكاوون $K^{*+}(u\overline{s})$، و$K^{*0}(d\overline{s})$، و$K^{*-}(s\overline{u})$، و$\overline{K}^{*0}(s\overline{d})$؛ وهي شبيهة بالميزونات π، وη وη' المعروفة بالرموز ρ وω وϕ (رو وأوميجا وفاي).

السحر

ليست الكواركات السفلية وحدها هي التي لها أبناء عمومة أثقل منها؛ وهي الكواركات الغريبة، بل للكواركات العلوية أيضًا نُسَخٌ أثقل منها تُسمَّى «الكواركات الساحرة». الكوارك الساحر يحمل شحنة كهربية، وله لف مغزلي قدره +٢ / ٣ مثل الكوارك العلوي، بَيْدَ أنه أثقل من الكوارك العلوي بطاقة مكافئة قدرها نحو ١٥٠٠ ميجا إلكترون فولت. أما فيما يخص النواحي الأخرى كافة، يبدو الكوارك العلوي والكوارك الساحر متماثلين.

في حالة الكواركات الغريبة، تَمكَّنَّا من تكوين باريونات وميزونات غريبة أثقل بنحو بضعة مئات ميجا إلكترون فولت من نظيراتها ذات النكهات العلوية والسفلية. يحدث

أمر مشابه في حالة الكواركات الساحرة، لكن بسبب كتلتها الأثقل، تكون الميزونات والباريونات الساحرة أثقل هي الأخرى؛ إذ يصل أخفها إلى نحو ١٩٠٠ ميجا إلكترون فولت، أو ما يساوي تقريبا ٢ جيجا إلكترون فولت. هذه الكتلة الأثقل هي أحد الأسباب وراء صعوبة إنتاج هذه الجسيمات بسهولة في الأشعة الكونية، ولم يصبح وجود الجسيمات والكواركات الساحرة معروفًا إلا مع استحداث تجارب خاصة في معجلات الجسيمات ذات الطاقات العالية في الربع الأخير من القرن العشرين.

يستطيع الكوارك الساحر الارتباط في مجموعات ثلاثية مع أي توليفة من الكواركات العلوية أو السفلية أو الغريبة، وذلك من أجل تكوين الباريونات الساحرة، بل الباريونات الساحرة الغريبة أيضًا. وقد رُصِدت بضعة أمثلة على اتحاد كواركين ساحرين مع كوارك علوي أو سفلي أو غريب. ونحن نتوقع أنه بمقدور ثلاثة كواركات ساحرة الاتحاد لتكوين باريون ذي وحدات ثلاث من السحر، لكننا في انتظار أدلة واضحة على حدوث مثل هذا الأمر.

يستطيع الكوارك الساحر الاتحاد مع كوارك مضاد منفرد من الكواركات (المضادة) العلوية أو السفلية أو الغريبة، إلا أن أشهر الأمثلة على ذلك هو ما يحدث حين يتَّحِد كوارك ساحر مع كوارك ساحر مضاد، $c\overline{c}$، ما يؤدي إلى شريك متعادل الشحنة الكهربية يضاف إلى البايونات وجسيمات إيتا المؤلَّفة من الكواركات $u\overline{u}$، أو $d\overline{d}$ أو $s\overline{s}$ كما سبق وأسلفنا. تبلغ كتلة جسيمات إيتا الساحرة الناتجة، η_c، ما يقل عن ٣٠٠٠ ميجا إلكترون فولت، أي نحو ٣ جيجا إلكترون فولت، ومن ثَمَّ فهي أخف مثال على النطاق الكامل المعروف باسم «طيف الجسيمات الساحرة».

من خلال ذلك الطيف تم اكتشاف خاصية السحر للمرة الأولى. يتكون جسيم إيتا الساحر، η_c، حين يتحد كلٌّ من الكوارك الساحر والكوارك الساحر المضاد، ولكلٍّ منهما لف مغزلي قدره ١ / ٢، بحيث يساوي اللف المغزلي الصافي صفرًا (انظر الشكل ٨-١). ومن الممكن أيضًا أن يتَّحِد لفاهما المغزليان بحيث يصير الناتج الإجمالي واحدًا صحيحًا، وهنا سيُنتِج حالة أثقل قليلًا ذات طاقة قدرها نحو ٣٫١ جيجا إلكترون فولت تُعرَف بالجسيم ساي، ψ. حين يلتقي إلكترون ببوزيترون ويفنيان بعضهما، فإنهما يكونان أكثر استعدادًا لهذا حين يكون إجمالي لفيهما المغزليين واحدًا صحيحًا. في مثل هذا التفاعل يتم الحفاظ على الطاقة وأيضًا على مقدار اللف المغزلي، وهذا له تأثير يتمثَّل في أنه لو وافق مقدارُ الطاقة المجتمع للإلكترون والبوزيترون مقدارَ الطاقة المكافئة

$\pi^{+} \uparrow \downarrow$ $u \bar{d}$	$\rho^{+} \uparrow \uparrow$ $u \bar{d}$
$\eta_c \uparrow \downarrow$ $c \bar{c}$	$\psi \uparrow \uparrow$ $c \bar{c}$

شكل ٨-١: اللف المغزلي للميزونات المؤلَّفة من كواركات. اللف المغزلي للكوارك العلوي، u، والسفلي، d، يضاف بعضهما لبعض بحيث يؤلفان الجسيم رو، ρ، الموجب الشحنة، أو يلغي بعضهما بعضًا بحيث يؤلفان الجسيم باي، π، الموجب الشحنة. تحدث توليفات مشابهة لأي خليط من النكهات العلوية والسفلية والغريبة للكواركات مع نظيرتها المضادة، والأمر عينه ينسحب على النكهات الساحرة والقاعية والقمية. ومن بين النتائج العديدة الممكنة أوضحنا بالشكل الجسيم ساي (ψ) الذي يصل فيه مجموع اللف المغزلي إلى واحد، وشريكه الجسيم إيتا الساحر، η_c، الذي يتلاشى فيه اللف المغزلي إلى الصفر.

للميزون ذي اللف المغزلي واحد — والمؤلف من كوارك وكوارك مضاد (ومن ثم فهو متعادل الشحنة الكهربية) — فمن ثم هذا الميزون سيُنتَج من الطاقة المتخلفة عن عملية الإفناء للإلكترون والبوزيترون. وهكذا، على سبيل المثال، إذا اصطدم إلكترون ببوزيترون على نحو مباشِر وكانت طاقتهما الإجمالية نحو ٠٫٨ جيجا إلكترون فولت — وهي كتلة الجسيمات ρ وω ذات اللف المغزلي واحد — فمن الممكن أن يتكوَّن أي من هذين الميزونين، أما إذا بلغت الطاقة نحو ١ جيجا إلكترون فولت فستتكون الميزونات من كوارك غريب وكوارك غريب مضاد، $s\bar{s}$، وتحديدًا الجسيم فاي، ϕ، أما إذا بلغت الطاقة ٣٫١ جيجا إلكترون فولت، فسينتج الميزون ساي، ψ، المكوَّن من كوارك ساحر وكوارك ساحر مضاد. هذه هي الكيفية التي عُثِر بها على أولى أمثلة طيف الجسيمات الساحرة في العام ١٩٧٤، والكيفية التي تم الكشف بها تدريجيًّا عن طيف الجسيمات.

$\uparrow\uparrow$	الاسم	الكتلة (جيجا إلكترون فولت)
$u\bar{u}$, $d\bar{d}$	ρ^0,ω	٠٫٨
$s\bar{s}$	ϕ	١
$c\bar{c}$	ψ	٣٫١
$b\bar{b}$	Υ	٩٫٥
$t\bar{t}$	؟	٣٧٠ (؟)

شكل ٨-٢: الميزونات ذات اللف المغزلي ١ التي يمكن إنتاجها بسهولة في عمليات إفناء الإلكترونات والبوزيترونات. إضافة إلى ذلك، من الممكن إنتاج فوتون أو بوزون Z^0، وهي الجسيمات التي لا تتكون من كواركات، بهذه الطريقة.

الجسيمات التي تحتوي على كواركات غريبة أو ساحرة ليست مستقرة؛ إذ إن كتلتها أكبر من تلك الخاصة بالميزونات أو الباريونات التي لا تحتوي على أي كواركات غريبة أو ساحرة، ومن ثَمَّ فإن طاقتها الحقيقية — الممثَّلَة بكتلتها مضروبة في مربع سرعة الضوء — أكبر؛ ولهذا رغم أنه من الممكن إنتاج الجسيمات الغريبة والساحرة في التصادمات العالية الطاقة داخل المعجلات، أو حتى في الطاقات القصوى التي سادت الحقبة التي تلت الانفجار العظيم مباشَرَةً، فإنها ستتحلل على الفور مخلِّفَةً كواركات علوية وسفلية داخل الباريونات «التقليدية» القادرة على البقاء في ظروف عالمنا الطبيعية، أما الميزونات فستدمر ذاتيًّا بفعل الإفناء المتبادل بين الكوارك والكواراك المضاد، منتِجَةً فوتونات أو إلكترونات ونيوترينوات كمنتجات نهائية مستقرة.

الكواركات القاعية والقمية

رأينا سلفًا كيف أن الطبيعة أوجدت مجموعة ثانية من نكهات الكواركات — الكواركات الغريبة والساحرة — باستخدام نفس الشحنات الكهربية لكن بكتل أثقل من نظيرتها العلوية والسفلية. قد يتساءل أحدهم عن سبب ذلك، إلا أن تلك ليست نهاية القصة؛ إذ

أوجدت الطبيعة مجموعةً ثالثة من الكواركات الأثقل، بنفس الشحنات الكهربية التي تحملها المجموعتان السالفتان. وهكذا صار لدينا الكواركات القاعية (b)، ولها طاقة مكافئة تبلغ نحو ٤٫٥ جيجا إلكترون فولت، وشحنة كهربية قدرها −١ / ٣، والكواركات القمية (t) ولها طاقة مكافئة تبلغ نحو ١٨٠ جيجا إلكترون فولت (ليس هذا خطأً مطبعيًّا!) وشحنة كهربية قدرها +٢ / ٣، إلا أن الكيفية التي حشدت بها الطبيعة مثلَ هذه الكتلة الضخمة، المماثلة لكتلة ذرة كاملة لعنصر الذهب، في مساحة قدرها ١٠$^{-١٨}$ أمتار، ستظل أحد أكبر ألغاز القرن الحادي والعشرين. في بعض الكتابات يطلق على هاتين النكهتين اسم الكوارك الحقيقي والكوارك الجميل، بدلًا من القمي والقاعي، إلا أنه تم الاتفاق بصورة عامة على التسمية الثانية، ومن ثَمَّ سأشير لهذه الكواركات هنا باسم الكواركات القمية والقاعية.

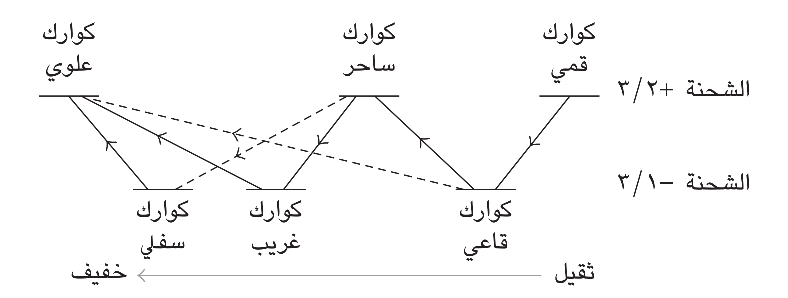
توجد باريونات وميزونات تحتوي على كواركات قاعية أو كواركات قاعية مضادة، وهي بالتبعية أثقل من نظيراتها المحتوية على الكواركات الغريبة الأخف الحاملة للشحنة عينها. أخف الميزونات القاعية له كتلة، أو طاقة مكافئة، قدرها نحو ٥ جيجا إلكترون فولت، وبالمثل هناك باريونات قاعية. لن نجني الكثير من الكتابة تفصيلًا عن خصائص هذه الباريونات، لكن إذا أردتَ التعرف عليها فما عليك إلا الذهاب إلى جدول الجسيمات الغريبة، وإحلال كوارك قاعي محل كل كوارك غريب، ثم تضيف كتلةً قدرها نحو ٤٫٥ جيجا إلكترون فولت لكل كوارك قاعي أو كوارك قاعي مضاد. أثارت الميزونات القاعية قدرًا من الاهتمام لأن سلوكها قد يمنحنا دلائل لحل لغزِ سببِ تكوُّن الكون من المادة على حساب المادة المضادة. هناك أيضًا حالات «طيف الجسيمات القاعية» المشابِهة لحالات طيف الجسيمات الساحرة، وأخف هذه الحالات، التي تتكون من كوارك قاعي وكوارك قاعي مضاد، لها كتلة قدرها نحو ٩٫٥ جيجا إلكترون فولت.

هنا قد تتوقَّع وجود الميزونات والباريونات المحتوية على كواركات قمية، وأن تكون خصائصها مشابِهةً لخصائص الجسيمات الساحرة (نظرًا لأن الكواركات القمية والساحرة لها الشحنة عينها)، وأن السمة المميزة الأساسية ستكون أنها أثقل بنحو ٢٠٠ جيجا إلكترون فولت من نظيراتها الساحرة. وقد يكون هذا هو الحال بالفعل، لكن لا أحد يعرف يقينًا بعدُ؛ لأننا لا نملك أي منشأة يمكنها إنتاج مثل هذه الجسيمات الضخمة بكمية تكفي لدراستها بالتفصيل المطلوب. ومع ذلك، هناك شك كبير في أن لمثل هذه الجسيمات وجودًا فعليًّا. المشكلة هي أن الكواركات القمية، بسبب ضخامتها

الهائلة، غير مستقرة للغاية، وتتحلل في أقل من ١٠^{-٢٥} ثوانٍ، غالبًا قبل أن يتاح لها الوقت لاقتناص كواركات أو كواركات أخرى مضادة كي تكوِّن الحالات المترابطة التي نطلق عليها الميزونات والباريونات.

يحدث التحلل بواسطة عملية مشابهة لتلك الخاصة بنشاط بيتا الإشعاعي. فمثلما يتحوَّل النيوترون إلى بروتون حين يتحول الكوارك السفلي إلى كوارك علوي (أخف)، مُطلِقًا طاقةً على صورة إلكترون ونيوترينو (من الناحية التقنية نيوترينو مضاد)، على النحو التالي:

$$d \longrightarrow u(e^{+}\overline{\nu})$$



شكل ٨-٣: عمليات التحلل الأساسية للكواركات. كل سهم يشير للأسفل يطلق بوزيترونًا ونيوترينو، $e^{+}\nu$، بينما كل سهم يشير للأعلى يطلق إلكترونًا ونيوترينو مضادًّا، $e^{-}\overline{\nu}$. يُظهِر الشكلُ أيضًا مسارين أقل ترجيحًا مبينين بالسهمين المتقطعين.

فإن الكواركات الأثقل تحاكي هذا السلوك. يكون الفارق بين الشحنات الكهربية لأي كواركات إما صفر أو ±١. في الحالة الأخيرة يمكن أن يقع التحلُّل من الكوارك الأثقل إلى الكوارك الأخف عن طريق إطلاق إلكترون أو بوزيترون على الترتيب (إلى جانب نيوترينو أو نيوترينو مضاد)، وهكذا يتكون لدينا متتالية من عمليات التحلل على النحو التالي:

$$t \longrightarrow b(e^{+}\nu); b \longrightarrow c(e^{-}\overline{\nu}); c \longrightarrow s(e^{+}\nu); s \longrightarrow u(e^{-}\overline{\nu})$$

وفي الخطوة الأخيرة يمكن أن يتبقى لدينا جسيم مستقر، على غرار البروتون، لكن من الممكن — وإن كان من غير المرجح — أن يتم التغاضي عن خطوة من خطوات سلسلة التحلل، على سبيل المثال $t \to d(e^{+}\nu)$ أو $b \to u(e^{-}\overline{\nu})$. أيضًا من المحتمل أن تتخذ الكواركات الساحرة طريقًا بديلًا $c \to d(e^{-}\overline{\nu})$، أو $d \to u(e^{+}\nu)$. للكواركات العلوية، u، والسفلية، d، كتل متشابهة، وهو ما ينعكس على الكتل المتشابهة لكلٍّ من البروتون والنيوترون، وهذا يجعل عملية التحلل من كوارك سفلي إلى علوي، $d \to u(e^{-}\overline{\nu})$، عمليةً بطيئةً، على سبيل المثال نصف العمر الخاص بالنيوترون الحر يبلغ طوله عشرَ دقائق. الفوارق الأخرى في الكتل أكبر، ومن ثَمَّ تقع عمليات التحلل على نحو أسرع، وفي حالة الكوارك القمي — كما نشك — تكون عملية التحلل بدرجة من السرعة بحيث لا يتاح الوقت أمام الباريونات القمية أو الميزونات القمية للتكوُّن من الأساس.

كيف رُتِّبَ هذا؟

يتكون عالمنا من كواركات علوية وسفلية، وإلكترونات ونيوترينوات، وهذه النيوترينوات تُعرَف باسم «النيوترينوات الإلكترونية»، ورمزها ν_e، وذلك للإشارة إلى حقيقة أنها شقيقة الإلكترونات. توجد ثلاث مجموعات من الكواركات في الطبيعة؛ إذ توجد أيضًا النكهات الساحرة والغريبة، وأيضًا القمية والقاعية، التي هي بمنزلة نسخ أثقل من الكواركات العلوية والسفلية ذات الشحنة الكهربية +٢ / ٣ و–١ / ٣. لكن هذا التقسيم الثلاثي لا ينطبق على الكواركات وحدها، بل هناك ثلاث مجموعات من كل جسيم ينتمي لعائلة اللبتونات بالمثل.

فهناك نسخة أثقل للإلكترون، تُعرَف بالميوون، ورمزها μ^{-}، وهي سالبة الشحنة الكهربية شأن الإلكترون. ويبدو الميوون (ونظيره الميوون المضاد، μ^{+}) مماثلًا في كل الجوانب تقريبًا للإلكترون أو البوزيترون، خلا أنه أثقل منهما بنحو ٢٠٧ مرات، بطاقة مكافئة تبلغ نحو ١٠٥ ميجا إلكترون فولت. في تفاعلات التحلل الضعيف، يُصاحَب الميوون بنيوترينو، بَيْدَ أنه نيوترينو مختلف عن النيوترينو ν_e الذي يصاحب الإلكترون، ونطلق على هذا النيوترينو اسم «النيوترينو الميووني»، ورمزه ν_μ (وهناك، بالطبع، جسيم مضاد له اسمه النيوترينو الميووني المضاد ورمزه $\overline{\nu}_\mu$).

ثمة مجموعة ثالثة من اللبتونات، وهي تتألف من التاوون، وهو جسيم سالب الشحنة يُشبِه الإلكترون، بَيْدَ أن كتلته تصل إلى نحو ٢ جيجا إلكترون فولت (ورمزه

τ^-، بينما الجسيم المضاد له رمزه τ^+)، والنيوترينو المصاحب له يُدعَى النيوترينو التاووني ورمزه ν_τ (أما الجسيم المضاد له فرمزه $\overline{\nu}_\tau$).

تتمايز النيوترينوات حسب كتلتها، تلك الكتلة الصغيرة للغاية بما يجعل قياسها مستحيلًا، إلا أننا بدأنا في الحصول على مقياس للفروقات الضئيلة بين كتلها. باختصار، يبدو أن الكتلة هي الملمح الأساسي الفارق بين أفراد «الأجيال» الثلاثة للجسيمات الأساسية. ومن واقع دراسة البوزون Z^0 نعرف أنه لا وجود لأي نيوترونات أخف من ذلك في الطبيعة، سبب هذا هو أننا قادرون على قياس مدة بقاء البوزون Z^0، وقد تبيَّنَ أن هذه المدة تتوافق مع تلك التي حسبها الفيزيائيون النظريون في حالة وجود ثلاث مجموعات متمايزة فقط من النيوترينوات يمكن أن تُنتَج عندما يتحلل هذا البوزون، فكلما زادت المجموعات، زادت سرعة تحلل البوزون Z^0 نظرًا لأن كل مسار متاح من شأنه أن يزيد أكثر وأكثر من عدم استقرار البوزون Z^0، وإذا كان هناك وجود لأي نيوترينوات خفيفة أخرى، فستتسبب هذه النيوترينوات في تقصير مدة بقاء البوزون Z^0، وهو ما يتناقض مع ما تم رصده في الواقع العملي. من هذا نخلص إلى أن هناك ثلاثَ مجموعات متمايزة فقط من هذه النيوترينوات الخفيفة.

جدول ٨-٣: الكواركات واللبتونات. تبلغ كتلة الكواركات العلوية والسفلية ما بين ٥ إلى ١٠ ميجا إلكترون فولت تقريبًا، فيما تبلغ كتلة الكواركات الغريبة نحو ١٥٠ ميجا إلكترون فولت. حين تكون الكواركات حبيسةً داخل الهادرونات فإنها تكتسب طاقة إضافية، وتسلك كما لو أن لها كتلة قدرها نحو ٣٥٠ ميجا إلكترون فولت ونحو ٥٠٠ ميجا إلكترون فولت على الترتيب. الكتل الفعلية للكواركات الأثقل لا تتأثر على هذا النحو البليغ حين تكون حبيسة الهادرونات. تبلغ كتلة الكواركات الساحرة نحو ١٫٥ جيجا إلكترون فولت، والقاعية نحو ٤٫٥ جيجا إلكترون فولت، والقمية نحو ١٨٠ جيجا إلكترون فولت.

الكواركات		اللبتونات	
الشحنة = +٢ / ٣	الشحنة = −١ / ٣	الشحنة = −١	الشحنة = ٠
كوارك علوي u	كوارك سفلي d	إلكترون e	نيوترينو إلكتروني ν_e
كوارك ساحر c	كوارك غريب s	ميوون μ	نيوترينو ميووني ν_μ
كوارك قمي t	كوارك قاعي b	تاوون τ	نيوترينو تاووني ν_τ

في ضوء هذه النتيجة، وفي ضوء ظننا بأن كل نوع من هذه النيوترينوات يقترن بلبتون سالب الشحنة، وأن هذه اللبتونات بدورها تقترن بنوعين من الكواركات — العلوية والسفلية ذات اللف المغزلي +٢ / ٣ و–١ / ٣ — بهذا نكون قد حدَّدنا المجموعة الكاملة لهذه الجسيمات الأساسية. لكل واحد من هذه اللبتونات والكواركات لف مغزلي قدره ١ / ٢، ومن ثَمَّ يبدو أن الطبيعة أنتجت لنا ثلاثة أجيال من الجسيمات الأساسية ذات اللف المغزلي ١ / ٢. لماذا ثلاثة؟ لا نعرف لهذا السؤال إجابة. لِمَ لم تكتفِ الطبيعة بمجموعة واحدة؟ لا نعرف الإجابة يقينًا لكننا نشك في أن الإجابة قد يكون لها علاقة بلغز آخَر: لماذا عدم التوازن هذا بين المادة والمادة المضادة في الكون؟

لغز المادة المضادة

تحيط بالمادة المضادة هالة من الغموض، تلك المادة التي يُفترض أن تكون نسخةً مطابقة من المادة المألوفة لدينا، لكن يكون فيها اليمين يسارًا، والشمال جنوبًا، ويسير الزمن فيها على نحو معكوس. وأكثر خصائص هذه المادة شهرةً هي قدرتها على تدمير المادة في غمضة عين، بحيث تحوِّل المادة التي تتألف منها أجسامنا إلى طاقة صافية. في الخيال العلمي، تغري الكواكب المكوَّنَة من المادة المضادة المسافرين جاذبةً إياهم نحو هلاكهم، حتى بينما تمد ذرات الهيدروجين المضاد محركات مركباتهم الفضائية بالطاقة. لكن في الواقع الفعلي، ووفق كل ما توصلنا إليه بعد عقود من الأبحاث الفيزيائية التجريبية، فإن الكون الوليد كان كأتون متقد من الطاقة، توازنت فيه مقادير المادة والمادة المضادة. وهذا يستدعي السؤال: لماذا لم تفنَ المادة والمادة المضادة في رقصة محمومة من الإفناء المتبادل؟ وما السبب وراء وجود أي شيء في كوننا اليوم، بعد مرور نحو أربعة عشر ألف مليون عام على مولده؟

يمس هذا اللغز حقيقة وجودنا ذاته؛ فأجسامنا تتألف من المادة، شأنها شأن كل شيء آخَر نعرفه في الكون، وليس هناك مناجم للمادة المضادة على الأرض، وهذا أمر مفهوم لأنها ستُدمَّر على الفور من قِبَل المادة المحيطة بها مُحدِثةً نتائج كارثية. بصورة ما، في غضون لحظات من الانفجار العظيم، تمكَّنَتِ المادة من أن تكون لها الكلمة العليا، وفنيت المادة المضادة، واستمرت الطاقة الحرارية المتخلفة عن هذا الدمار (اليوم تبلغ حرارتها ٣ درجات فوق الصفر المطلق، وتُعرَف باسم إشعاع الخلفية الكوني)، وفي

نهاية المطاف تكتَّلَ ما تبقَّى من مادة مكوِّنًا مجرات النجوم. لا بد من وجود ما يميِّز المادة عن المادة المضادة، وهذا الفارق المميز هو ما جعل الكلمة العليا للمادة.

سنصف في الفصل التالي تتابُع الأحداث الذي مكَّنَ أجزاء المادة الأساسية من التكوُّن داخل النجوم، إلى أن كوَّنَتْ في النهاية المادةَ الكثيفةَ التي نجدها اليوم. أما في هذا الفصل فسنناقش مسألةَ الاختلاف بين المادة والمادة المضادة.

انشغل الفيزيائيون وعلماء الكونيات بهذه المسألة لسنوات. ظهر أحد الأدلة الحاسمة الخاصة بهذا الأمر عام ١٩٦٤، ومؤخرًا فقط — في أعقاب المزيد من الاكتشافات والتطورات التكنولوجية — صار من الممكن الاستفادة من هذا الدليل وربما حسم المسألة تمامًا. كان هذا الدليل هو اكتشاف أن ثمة انعدامًا بسيطًا في التوازن تظهره الطبيعة؛ ميلًا في سلوك بعض الجسيمات «الغريبة» بعينها، على غرار الكاوون K^0 المتعادل الشحنة الذي لا يحاكيه على نحو دقيق نظيره المضاد $\overline{K}^0$.

اكتُشِفت الجسيمات الغريبة عام ١٩٤٧ وسط الحطام المتخلف عن اصطدام الأشعة الكونية بطبقة الغلاف الجوي العليا، وقد ساعد إدراكنا أن هناك مادة عجيبة من نوعٍ ما في الكون على تحفيزنا لبناء معجلات الجسيمات، التي صارت قادرةً على إنتاج جسيمات غريبة — على غرار ميزونات كيه (التي تحتوي على كاوون) — بوفرة. وهكذا في عام ١٩٦٤ اكتشف فريق من العلماء في مختبر بروكهافن الوطني في نيويورك أنه في نحو كل مليون عملية تحلُّل لميزونات كيه، أخفقت المادة والمادة المضادة في التوازن لمرة واحدة.

يتسم انعدام التناظر هذا بأنه طفيف للغاية، لدرجة أن تقصِّيه كان من أكثر عمليات القياس صعوبةً وحساسيةً في الفيزياء الحديثة، وقد حدث تقدُّم مفاجِئ عام ١٩٧٧ عند اكتشاف أول أمثلة على الجسيمات «القاعية»، وإدراك أنها في حقيقتها النُّسَخ الأثقل للجسيمات الغريبة. ومثلما تُبرِز الجسيماتُ الغريبة الفارقَ بين المادة والمادة المضادة، يمكن أن يحدث الأمر عينه مع الجسيمات القاعية. وبالفعل، حين أكَّدَ اكتشاف الكواركات القمية والقاعية أن الطبيعة أوجدت ثلاثة أجيال من الكواركات، ومن الكواركات المضادة، بدت المعادلات الناتجة على نحو مدهش وكأنها تقضي ضمنًا بأن عدم التناظر بين المادة والمادة المضادة في الجسيمات القاعية كان حتميًّا. لقد تَمَّ التنبؤ بأن انعدام التناظر الطفيف للغاية بين الكاوون K^0 والكاوون المضاد $\overline{K}^0$، سيكون كبيرًا في حالة الميزونات القاعية B^0 و$\overline{B}^0$. هل يمكن لوجود ثلاثة أجيال، وتحديدًا وجود الكواركات القاعية، أن يحمل بشكلٍ ما مفتاحَ حلِّ هذا اللغز؟ فبما أن الكواركات القاعية

كانت وفيرة في اللحظات الأولى من عمر الكون، هل يمكن لها أن تحمل سرَّ ظهورِ هذا الكون غير المتناظر، الذي تهيمن عليه المادة اليوم؟

للإجابة على هذا السؤال كان من الضروري إنتاج مليارات من الميزونات القاعية والميزونات القاعية المضادة، ودراستها تفصيلًا. ولتحقيق هذا المأرب صُمِّمَت «مصانع الميزونات القاعية» — وهي معجلات تتصادم فيها الإلكترونات والبوزيترونات على طاقات قدرها نحو ١٠ جيجا إلكترون فولت، ومن ثَمَّ تُنتَج الميزونات القاعية والميزونات القاعية المضادة فيها بغزارة — وشيدت في كاليفورنيا واليابان. إنها آلات صغيرة الحجم نسبيًّا بمعايير فيزياء الجسيمات الحديثة، لا يزيد محيطها عن بضع مئات من الأمتار، بَيْدَ أنها تحوي حِزَمًا عالية الكثافة يجري التحكُّم فيها بمستوى كبير غير مسبوق من الدقة.

اكتمل المعجلان عام ١٩٩٩، وبعد الاختبار التجريبي بدأ المعجلان في جمع البيانات، لكن الحصول على نتائج حاسمة سيتطلب إنتاج ودراسة أعداد هائلة من الجسيمات القاعية. الأمر أشبه بإلقاء عملة: فقد تتسبَّبت الصدفة في ظهور أحد الوجهين خمس أو عشر مرات على التوالي، لكن لو استمر هذا في الحدوث، فلا بد من أن شيئًا ما يميِّز هذه العملة. وهكذا الحال عند دراسة الجسيمات دون الذرية السريعة الزوال؛ فهي تعيش لأقل من غمضة عين، وما يتبقَّى بعد موتها — بقايا حفرياتها لو شئتَ أن تسميها هكذا — هو ما نجحنا في فك شفرته، ونحن بحاجة لأعداد كبيرة للغاية من هذه الحفريات كي نعرف ما إذا كانت الفوارق حقيقيةً أم نتاجَ الصدفة.

هناك أنواع عديدة من الحفريات يمكن دراستها، وقد بدأت فِرَقٌ متخصِّصة في المعجلَيْن في جمع وقياس خصائص العديد من هذه الحفريات. ضمن هذه الحفريات هناك نوع معين يُعرَف باسم «تفاعل الجسيم ساي-الكاوون القصير» — فيه يتحلل الميزون القاعي أو الميزون القاعي المضاد مخلفًا الجسيم ساي، إلى جانب خليط معين من الكاوونات والكاوونات المضادة — يتنبَّأ المنظرون أنه سيكون أوضح المؤشرات على وجود اختلافٍ بين المادة القاعية والمادة القاعية المضادة. وبحلول عام ٢٠٠٣ صار من الجلي أن هذه التحللات تُظهِر فارقًا كبيرًا بين المادة والمادة المضادة، حسب ما جرى بالفعل التنبؤ به، وسنحتاج عدة سنوات من دراسة خصائص الجسيمات القاعية، من أجل تحديد ما إذا كانت الإجابة الكاملة للغزِ انعدامِ التناظر بين المادة والمادة المضادة على المستوى الكبير تكمن في البذور الأساسية للمادة، أم أن انعدام التناظر الذي تُظهِره الجسيمات الغريبة والقاعية ما هو إلا ظاهرة غامضة مقتصرة على هذه الصور العجيبة من الجسيمات.

الفصل التاسع

من أين أتت المادة؟

النجوم هي مصانع لإنتاج العناصر الثقيلة من الهيدروجين الخام. والكواركات هي البذور الأساسية التي ينتج منها الهيدروجين. ما الذي نعرفه عن سلوك الجسيمات في الحقب المبكرة من عمر الكون؟

* * *

إننا ندين بوجودنا لسلسلة من الصُّدَف السعيدة؛ حقيقة أن الشمس تحترق بالمعدل المناسب (فلو كانت تحترق بمعدل أسرع من هذا، لَنفد وقودها قبل أن تتيح فرصةَ ظهور الحياة الذكية على الأرض، ولو كانت تحترق أبطأ من هذا لربما كانت الطاقة غير كافية لدعم العمليات الكيميائية الحيوية والحياة على الإطلاق)، وحقيقة أن البروتونات — بذور الهيدروجين — جسيمات مستقرة، وهو ما يمكِّن النجوم من إنتاج العناصر الكيميائية اللازمة لبناء الحياة على الأرض، وحقيقة أن النيوترونات أثقلُ بمقدار طفيف من البروتونات، وهو ما يمكِّن حدوث نشاط بيتا الإشعاعي الذي يحوِّل الجسيمات على غرار بروتونات الهيدروجين إلى هليوم، وهو ما يمكِّن بدوره الشمس من السطوع. ولو أن أيًّا من هذه الحقائق — وغيرها الكثير — تغيَّرَ بقدر طفيف، لما كان لنا أي وجود.

البشر، وكل شيء آخَر في الكون، يتكوَّن من ذرات. من أين أتت هذه الذرات؟ في وقت حديث (وأعني بهذا منذ خمسة مليارات عام!) تكوَّنَتِ الذرات داخل النجوم الميتة منذ زمن، حيث تكوَّنت من البروتونات أنويةُ أبسط العناصر الذرية؛ الهيدروجين. تكوَّنت البروتونات في وقت مبكر للغاية من عمر الكون إلى جانب الجسيمات الأساسية المكونة لها؛ الكواركات. والأمر عينه ينطبق على الإلكترونات التي تكوَّنت في اللحظات الأولى من عمر الكون. هذا الفصل يصف الكيفية التي تكوَّنت بها المادة التي تتألَّف منها أجسادنا.

البروتونات هي المكوِّن الرئيس للشمس، وهي ما يزودها بالوقود اليوم. لنَصِفْ أولًا كيف تعمل الشمس وكيف توفِّر لنا الطاقة كي نعيش. الهيدروجين هو أبسط الذرات؛ إذ يتكوَّن من إلكترون وحيد سالب الشحنة يدور حول بروتون مركزي موجب الشحنة، قد يكون الهيدروجين شحيحَ الوجود نسبيًّا على الأرض (باستثناء حينما يكون حبيس جزيئات كجزيء الماء H_2O)، بَيْدَ أنه أكثر العناصر الذرية شيوعًا في الكون إجمالًا. في درجات الحرارة المماثلة لحرارة الأرض، تستطيع الذرات البقاء، لكن في درجات الحرارة العالية — فوق بضعة آلاف درجة — لا تظل الإلكترونات حبيسة الذرات بل تجول في حرية، وهنا يقال إن الذرة في حالة تأيُّن. هذا هو الحال داخل الشمس؛ إذ تحتشد الإلكترونات والبروتونات على نحوٍ مستقل في حالة من حالات المادة تُعرَف بالبلازما.

قد تصطدم البروتونات بعضها ببعض بحيث تبدأ مجموعة من العمليات النووية في النهاية تحويل كل أربعة بروتونات إلى نواة ثاني أبسط العناصر: الهليوم. والطاقة الحبيسة داخل نواة الهليوم المنفردة (الطاقة = الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء) تكون أقل من تلك الحبيسة داخل البروتونات الأربعة الأصلية. هذه الطاقة «الفائضة» تُطلَق إلى الأجواء المحيطة، وبعض منها يوفِّر لنا الدفء هنا على الأرض.

لا بد للبروتونات أن تتلامس كي تندمج معًا وتكوِّن نواة الهليوم، وهذا أمر عسير؛ لأن شحناتها الموجبة تميل إلى التنافر، وهو ما يُبقِيها بعيدًا عن بعضها، إلا أن درجة الحرارة البالغة ١٠ ملايين درجة مئوية تمنحها من طاقة الحركة ما يكفي بحيث تتمكَّن من الاقتراب بعضها من بعض وتبدأ عملية الاندماج النووي. لكن هذه الحرارة كافية إلى هذا الحد وحسب؛ فبعد انقضاء خمسة مليارات عام على مولد البروتونات، أُتِيحت لكل بروتون منفرد فرصة قدرها ٥٠ بالمائة في أن يشارك في التفاعل. بعبارة أخرى، إلى وقتنا هذا، استهلكت الشمس نصف مخزونها من الوقود.

هذه أولى المصادفات السعيدة. فالبشر هم ذروة عملية التطور، وقد استغرق البشر نحو خمسة مليارات عام حتى يظهروا، ولو أن الشمس احترقت بمعدل أسرع، لفنيت قبل أن يظهر البشر.

لننظر إذن إلى ما يحدث ونتدبَّر السببَ وراء هذا التوازن الدقيق الملائم.

الخطوة الأولى هي حين يلتقي بروتونان ويتلامسان، يمر أحد البروتونين بنوع من التحلل الإشعاعي، بحيث يتحوَّل إلى نيوترون ويطلق بوزيترونًا (الجسيم المضاد للإلكترون) ونيوترينو. في الأحوال العادية النيوترون هو الذي يتحلل بسبب كتلته

الأضخم — وما يصاحبها من عدم استقرار — إلى بروتون وإلكترون ونيوترينو، أما البروتون المنفرد فيكون مستقرًّا؛ وذلك لأنه أخف الباريونات. لكن حين يتلامس بروتونان، فإنهما يستشعران قوة التنافر الكهروستاتيكية، وهذا يضيف إلى طاقتهما الإجمالية ما يجعلها تتخطى طاقة الديوترون (نواة الديوتريوم المكوَّنة من بروتون ونيوترون مرتبطين معًا). نتيجة لذلك يستطيع أحد البروتونين التحوُّل إلى نيوترون، والذي يرتبط بعد ذلك ببروتون آخَر، وهو ما يزيد من الاستقرار. يؤدي تحلل البروتون هذا إلى وجود نيوترون ونيوترينو وبوزيترون، وهو الجسيم الموجب الشحنة المضاد للإلكترون.

وهكذا ينتِج الجزء الأول من دورة الاندماج النووي الشمسي مادة مضادة! تُدمَّر البوزيترونات على الفور تقريبًا حين تصطدم بالإلكترونات الموجودة في البلازما، بحيث ينتج عن تصادم كل إلكترون وبوزيترون فوتونان يتشتتان بعيدًا بفضل البلازما المشحونة كهربيًّا، حتى يصلا في النهاية إلى سطح الشمس (يستغرق هذا عدة آلاف من الأعوام)، وفي غضون هذا الوقت تقل طاقتاهما كثيرًا، ويساعد هذان الفوتونان في تكوين جزء من ضوء الشمس. أما النيوترينوات فتتدفق من قلب الشمس دون إعاقة وتصلنا في غضون دقائق معدودة.

ماذا يحدث إذن للنيوترون والبروتون؟ يلتصق الاثنان بعضهما ببعض التصاقًا وثيقًا، وذلك بفضل القوة النووية الشديدة، ويتحدان: وهذا الثنائي يشكِّل نواة الهيدروجين الثقيل؛ الديوترون. هذا الديوترون يجد نفسه وسط عدد كبير للغاية من البروتونات، التي لا تزال تشكِّل السواد الأعظم من كتلة الشمس. وسريعًا جدًّا يرتبط الديوتريوم ببروتون آخَر ليكوِّنا نواة الهليوم: الهليوم٣. يمكن لنواتين من أنوية الهليوم٣ أن تتحدا وتعيدا ترتيب أجزائهما بحيث يتكون الهليوم٤ (وهي الصورة المستقرة الشائعة للهليوم)، وتتخلصان من البروتونين الفائضين.

نتيجةُ كل هذا العمل إذن هي أن أربعة بروتونات أنتجت نواة هليوم وحيدة، واثنين من البوزيترونات واثنين من النيوترينوات. البروتونات هي الوقود، والهليوم هو الرماد المتخلف، والطاقة تتحرَّر على صورة أشعة جاما وبوزيترونات ونيوترينوات.

الخطوة الأخيرة — التي يكون فيها الديوترون وأحد البروتونات الهليوم٣ تمهيدًا لتكوين الهليوم٤ — تقع على نحو لحظي تقريبًا، فالتأخير في حدوث الخطوة الأولى، التي يتحد فيها بروتونات من أجل تكوين الديوترون والنيوترينو والبوزيترون، هي التي تحكم الاحتراق (البطيء) للشمس، وهو الأمر ذو الأهمية البالغة لنا.

في قلب الشمس

(١)

الديوترون

(٢)

هليوم٣

(٣)

هليوم٤

الناتج النهائي

٤ بروتونات ← هليوم٤ + ٢ بوزيترون + ٢ نيوترينو

بروتون

بوزيترون

نيوترون

نيوترينو

شكل ٩-١: تحويل الهيدروجين إلى هليوم داخل الشمس.

يعتمد معدل الاحتراق على شدة القوة الضعيفة، التي تحوِّل البروتون إلى نيوترون (في تحويل بيتا عكسي)، وهذه القوة لها مكافئ في القوة الكهرومغناطيسية، كما وصفنا من قبلُ. والقوة الكهرومغناطيسية تنتقل بواسطة الفوتونات، التي يتم تبادلها بين جسيم مشحون كهربيًّا وآخَر. الفوتونات عديمة الكتلة، وهذا يمكِّنها من الانتشار إلى مسافات عظيمة دون قيود حفظ الطاقة، وهذا يمنح القوة الكهرومغناطيسية مدى بعيدًا. لكن القوة الضعيفة، على العكس من هذا، تدين بضعفها هذا (على الأقل على مستوى الطاقات المألوفة على الأرض والشمس) إلى الكتلة الكبيرة للبوزون W وما يرتبط بها من مدى محدود.

إذن ما يتحكم في بطء الاحتراق الشمسي هو ضعف القوة النووية الضعيفة، والذي بدوره محكوم بالكتلة الضخمة للبوزون W، ولو كانت كتلة هذا الجسيم أصغر، لكان من شأن الشدة الفعلية للقوة «الضعيفة» أن تكون أكبر، وكان الاحتراق الشمسي سيسير بمعدل أسرع. لماذا يملك البوزون W هذه الكتلة الملائمة؟ لا نعرف الجواب، بل إننا لا نعرف يقينًا من أين أتت هذه الكتلة، ولكن هناك فِكَرًا خرج بها بيتر هيجز من شأنها أن تتعرض للاختبار قريبًا جدًّا (في الفصل العاشر).

هناك أمثلة أخرى تلعب فيها الكتل دورًا حساسًا في تحديد مصيرنا؛ فكما ناقشنا سلفًا، يتضمن تحلُّل بيتا الإشعاعي تحوُّل النيوترون إلى بروتون مع انبعاث إلكترون ونيوترينو. هذا يستلزم أن يكون النيوترون أثقل من البروتون، وهذا هو الحال بالفعل، ومن ثَمَّ يكون البروتون هو البذرة المستقرة للذرات والكيمياء. (لو كانت كتلة النيوترون أخف مما هو عليه، لكانت النيوترونات هي الأجزاء المستقرة المتخلفة عن الانفجار العظيم، وهذه الجسيمات متعادلة الشحنة كانت ستعجز عن اجتذاب الإلكترونات من أجل تكوين الذرات، ومن ثَمَّ كانت الكيمياء لتختلف تمامًا عمَّا نعرفه، أو لم تكن لتوجد من الأساس.) النيوترون أثقل من البروتون بجزء واحد على الألف، لكن من حسن الحظ أن هذا المقدار كافٍ لإنتاج الإلكترون، أو بعبارة أخرى، كتلة الإلكترون صغيرة بما يكفي بحيث يمكن للإلكترون أن ينشأ بفعل هذه العملية. ولو كانت كتلة الإلكترون أكبر لَتجمَّد تحلُّل بيتا وانعدم التفاعل داخل الشمس، ولو كانت أصغر من ذلك لسار تحلُّل بيتا على نحو أسرع، ولَسارت العمليات الديناميكية داخل الشمس على نحو مختلف، ولصارت شدة الأشعة فوق البنفسجية أكبر، وهو الأمر غير الصحي لنا. (تساعد كتلة الإلكترون في تحديد حجم ذرات كالهيدروجين، فالكتلة الأصغر ترتبط بذرة أكبر، والعكس بالعكس؛ لذا فإن أحد الأسباب وراء امتلاك الأشياء للحجم الذي تملكه الآن، هو أن كتلة الإلكترون بالمقدار الحالي تمامًا.) ولا نعرف لهذا النمط الخاص بالكتل سببًا بعدُ.

إذن، تسطع الشمس بفضل الاندماج النووي، وبعد خمسة مليارات عام أخرى، سينفد مخزونها من الهيدروجين، ويتحوَّل إلى هليوم. بعض أنوية الهليوم تندمج بالفعل مع بروتونات وأنوية هليوم أخرى مكوِّنة البذور النووية للعناصر الأثقل. هذه العمليات تنتج النيوترينوات أيضًا، وبعض هذه النيوترينوات ذات طاقات أعلى من تلك المنتجة بفضل عملية اندماج البروتونات الأولية، وهكذا من خلال رصد النيوترينوات الآتية من الشمس، وقياس طيف طاقاتها، يمكننا الحصول على نظرة كمية أولى داخل الشمس؛ أقرب النجوم إلينا.

بعد خمسة مليارات عام ستكون هذه هي العمليات الأولية، إلى جانب عمليات الاندماج لبناء عناصر أثقل. في بعض النجوم (لكن ليس في شمسنا) تتواصَل هذه العملية، مكوِّنة أنوية العناصر وصولًا إلى الحديد أكثر العناصر استقرارًا (هناك عناصر أخرى بعد الحديد تُبنَى لكنها أكثر ندرة بكثير). وفي النهاية يعجز مثل هذا النجم عن مقاومة ثقله، وينهار على نحو كارثي. تتسبب موجات الصدمة في قذف المادة والإشعاع في الفضاء، وهنا يعرف النجم باسم المستعر الأعظم. إذن تبدأ النجوم بالهيدروجين، وبهذا المكوِّن تتمكَّن من إنتاج كل عناصر الجدول الدوري، والمستعرات العظمى هي السُّبُل التي تنتشر بها هذه البذور الكونية للعناصر الكيميائية في أرجاء الكون.

من أين إذن أتت مادة النجوم الأولية؟

الكون المبكر

ظهرت الكواركات، الأجزاء الأساسية للمادة النووية، نتيجة الانفجار العظيم، وذلك إلى جانب الإلكترونات، ثم برد الكون سريعًا بحيث تمكَّنَتِ الكواركات من التجمُّع معًا مكوِّنة البروتونات. وقد حدثت العمليات التالية:

إلكترون + بروتون ⇋ نيوترون + نيوترينو

السهم المزدوج الموضوع هنا هدفه إيضاح أن هذه العملية تحدث في أي من الاتجاهين. النيوترون أثقل قليلًا من الكتلة المجتمعة للبروتون والإلكترون؛ لذا كان الاتجاه «الطبيعي» للعمليات هو من اليسار إلى اليمين، إذ إن النيوترون يميل بطبيعته إلى تقليل كتلته الإجمالية، مُطلِقًا الطاقة حسب المعادلة «الطاقة = الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء». لكن حرارة الكون كانت عالية للغاية لدرجة أن الإلكترونات والبروتونات كانت تتمتع بقدر كبير من طاقة الحركة يجعل طاقتها الإجمالية تتجاوز الطاقة الحبيسة داخل كتلة النيوترون (الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء). وهكذا في ظل هذه الظروف كان من الممكن أن تسير العملية في سهولة من اليسار إلى اليمين (أي أن يتحول الإلكترون والبروتون إلى نيوترون ونيوترينو)، مثلما كانت تسير في اتجاه تحويل النيوترون والنيوترينو إلى بروتون وإلكترون ذوي شحنة كهربية. في هذه الظروف نقول إن الكون كان في حالة من التوازن الحراري.

لكن الكون كان آخِذًا في البرودة بسرعة، وهو ما جعل من العسير استمرار عملية إنتاج النيوترونات، وبعد ميكروثانية كان الكون قد برد إلى نقطةٍ تجمَّدَ معها تفاعل إنتاج النيوترونات فعليًّا. أما التفاعل الذي استمر فهو كالتالي:

نيوترون ⟵ بروتون + إلكترون + نيوترينو مضاد

إبَّان هذه الحقبة، فنيت كل النيوترونات التي قد أُنتِجت في الحرارة المبدئية للكون. وكل عشر دقائق كان يقل عددها إلى النصف (نقول إن لها «عمر نصف» قدره عشر دقائق). لم يَعُدْ هناك من الطاقة ما يكفي لإحلالها، لكن لم تفنَ كل النيوترونات؛ إذ اصطدمت بعض النيوترونات السعيدة الحظ ببروتونات، ومن ثَمَّ اندمجت معها كي تؤلِّف الديوترون (منظومة متحدة من بروتون وحيد ونيوترون وحيد، وهو أثقل من البروتون والنيوترون منفردين).

في هذه المرحلة، كان الكون بأسره يمر بما تمر به الشمس في وقتنا الحالي؛ إذ كانت البروتونات والديوترونات تبني ذرات الهليوم. ظل هذا يحدث إلى أن انتهت كل النيوترونات نهائيًّا، أو صارت الجسيمات الموجودة داخل الكون المتمدد بعيدة بعضها عن بعض، بحيث استحال عليها التفاعل معًا.

بعد انقضاء ميكروثانية واحد على الانفجار العظيم، كانت كل النيوترينوات التي أُنتِجت في هذه التفاعلات حرة؛ ومن ثَمَّ صارت هذه النيوترينوات أولى البقايا الحفرية للكون، وقد تحرَّكت بسرعة عالية وتسببت كتلتها، رغم ضآلتها، في قدر كافٍ من الجذب بين الهادرونات بحيث صارت تتكتل معًا، وهو ما أسهم في تكوُّن المجرات. يُنتَج نحو مليار نيوترينو مقابلَ كل ذرة يتم تكوينها، ولهذا تُعَدُّ النيوترينوات من أكثر الجسيمات وفرةً في الكون، ورغم أننا نعرف على الأقل أن بعض أنواع النيوترينوات له كتلة، فإننا لا نعرف بعدُ مقدارَ هذه الكتلة. فلو أن كتلة النيوترينو تزيد عن بضعة إلكترون فولت؛ أي ما يوازي واحدًا على المليار من كتلة البروتون، فستهيمن كتلة النيوترينوات على كثافة كتلة الكون المادي؛ لهذا يمكن أن يكون تحديد كتلة النيوترينوات مسألة مهمة في التنبؤ بالمستقبل البعيد للكون. هل سيتمدد الكون إلى الأبد، أم سينهار على نفسه بفعل ثِقَله؟ لا نعرف الجواب يقينًا.

يواصل الكون تمدُّده وفقدان الحرارة، ومبادئ الفيزياء التي تحكم تمدده مشابهة نوعًا ما لتلك التي تحكم سلوك الغاز الموضوع في وعاء حاوٍ. يعتمد معدل التمدد على

الضغط، والذي يعتمد على حرارة الغاز وعدد النيوترينوات داخل الغاز (كثافته)، هذا بدوره يعتمد على عدد أنواع النيوترينوات.

بعد انقضاء ثلاث دقائق على الانفجار العظيم، كانت مادة الكون تتألف في الأساس من الآتي: ٧٥٪ بروتونات، ٢٤٪ هليوم، ونسبة طفيفة من الديوترونات، ومقادير ضئيلة من العناصر الخفيفة والإلكترونات الحرة.

اعتمدت وفرة الهليوم وغيره من العناصر الخفيفة على معدل تمدد الكون، والذي بدوره اعتمد على عدد أنواع النيوترينوات. المقدار المرصود من الهليوم يتماشى مع التنبؤات التي تقضي بوجود ثلاثة أنواع من النيوترينوات. إن حقيقة أن قياسات البوزونات Z في مختبر سيرن قد أكَّدت وجود ثلاثة أنواع من النيوترينوات الخفيفة، تُظهِر انسجامًا استثنائيًّا بين قياسات فيزياء الجسيمات — التي تستنسخ الظروف التي كانت سائدةً في الحقبة المبكرة من عمر الكون — وبين ما استنتجه علماء الكونيات مما سَبَق.

تعتمد وفرة الديوتريوم على كثافة المادة «العادية» في الكون (ونعني بالعادية هنا المادة المكونة من نيوترونات وبروتونات مقارنةً بالأشياء العجيبة التي قد يحلم بها المنظرون، لكن ما من دليل تجريبي مباشر إلى الآن على وجودها، على غرار التناظر الفائق. انظر الفصل العاشر). ثمة اتفاق بين الأرقام جميعها، لكن شريطة أن تكون كثافة المادة العادية أقل بكثير من الكثافة الإجمالية لمادة الكون، وهذا جزء من لغز المادة المظلمة؛ فهناك مادة موجودة بالكون، لكنها ليست ساطعة، بل يتم استشعارها من واقع جاذبيتها التي تسحب النجوم والمجرات. ويبدو أن أغلب هذه المادة المظلمة مكوَّنٌ من مادة عجيبة لم نكتشف هويتها بعدُ.

بعد الانفجار العظيم بنحو ٣٠٠ ألف عام، انخفضت حرارة الكون الإجمالية لما دون ١٠ آلاف درجة، وهذا مقارب لحرارة النطاقات الخارجية للشمس اليوم، أو أقل بقليل. في هذه الطاقات صارت الإلكترونات السالبة الشحنة الكهربية قادرة أخيرًا على الخضوع لقوة الجذب الكهربي لأنوية الذرات الموجبة الشحنة، ومن ثَمَّ فقد اتَّحَدت معها مكوِّنة الذرات المتعادلة الشحنة. تحرَّرَ الإشعاع الكهرومغناطيسي وصار الكون شفَّافًا، بينما انطلق الضوء دون عائق في أرجاء الفضاء.

إلى الآن، تمدَّد الكون وبردت حرارته لنحو ١٠ إلى ١٥ مليار عام، والإشعاع الكهرومغناطيسي الذي كان فيما مضى حارًّا صار يُكَوِّن الآن طيفَ جسم أسود ذا درجة حرارة قدرها نحو ٣ درجات فوق الصفر المطلق. ويُعَدُّ هذا الاكتشاف الذي قام به كلٌّ

من بنزياس وويلسون منذ نحو نصف القرن أحدَ أعظم الاكتشافات التي تدعم نظرية الانفجار العظيم، واليوم تكشف قياسات الدقة التي تجرى على هذا الطيف بواسطة الأدوات المحمولة على أقمار صناعية، عن تفاوتات طفيفة في الإشعاع الميكروني الكوني، وهذه التفاوتات تشير إلى أوائل المجرات التي تكوَّنت في الحقبة المبكرة من عمر الكون.

وهكذا يكون لدينا فهم كمي، بل نوعي أيضًا، للكيفية التي انتهت بها بذور المادة الأساسية داخل أجسادنا، لكن يظل هناك لغز يكتنف ظهورها بصحبة المادة المضادة في ذلك الانفجار العظيم، وهو: أين ذهبت المادة المضادة كلها؟ في مطلع القرن الحادي والعشرين، لا يزال هذا أحد الأسئلة التي ننتظر لها جوابًا.

الفصل العاشر

أسئلة تنتظر الإجابة في القرن الحادي والعشرين

في هذا الفصل سنناقش السؤال التالي: إلى أين سنذهب بعد ذلك؟ وسنتعرض للموضوعات التالية: المادة المظلمة في الكون. بوزون هيجز، ما هو؟ ولماذا نهتم بشأنه؟ وكيف يمكننا العثور عليه؟ قياسات الدقة المجراة على الجسيمات العجيبة الثقيلة. هل هناك أبعاد أخرى أكثر من تلك التي نتقبَّلها في وقتنا الحالي؟ كيف ستُظهِر هذه الأبعاد نفسها في التجارب؟ سنستعرض أيضًا مستقبل المعجلات. هل ستكون هناك نهاية لفيزياء الجسيمات العالية الطاقة؟

* * *

المادة المظلمة

البروتونات وأنوية الذرات العادية هي أساس كل أشكال «المادة الساطعة» التي تظهر في جميع مشاهداتنا الفلكية. ومع ذلك، فإن حركة المجرات الحلزونية مثلًا، تبيِّن أن المادة الساطعة المرصودة لا تفسِّر وحدها قوة الجذب المؤثرة على هذه المجرات. إن أكثر من ٩٠ بالمائة من المادة لم يُرصَد بعدُ، ويبدو أن الكون الذي نراه بواسطة إشعاعاته الكهرومغناطيسية أقل بكثير في الحجم من تلك المادة المظلمة الغامضة التي لا تظهر مطلقًا على أي طول موجي في تليسكوباتنا.

لو أن هناك وجودًا لـ «أجرام الهالة الهائلة المضغوطة»، التي يمكن أن تَكُون أجرامًا في حجم كوكب المشتري، لكنها ليست كبيرة بما يكفي كي تكون نجومًا ساطعة أو ثقوبًا سوداء؛ فسيكون من الممكن رصدها من خلال التقاط صور ثنائية أو متعددة للنجوم

أو المجرات البعيدة، وذلك بفضل تأثير عدسة الجاذبية، إلا أن البحث بهذه الوسيلة لم يتمخض بعدُ عن عدد كافٍ من أجرام الهالة الهائلة المضغوطة بحيث يفسِّر المقدار الهائل من المادة السوداء التي يبدو أن الكون يحتوي عليها؛ ولهذا تحوَّلَ الفيزيائيون الفلكيون وعلماء الكونيات إلى فيزياء الجسيمات للحصول على المزيد من الفِكَر.

من الأفكار المحتملة المثيرة للاهتمام فكرة أن المادة المظلمة قد تتكوَّن من كميات هائلة من الجسيمات دون الذرية التي لا تتفاعل تفاعلًا كهرومغناطيسيًّا (وإلا لكنَّا رصدنا الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر عنها). أحد الجسيمات المرشحة بقوة هو النيوترينو، الذي يمكن أن تتسبَّب كتلته الطفيفة، لكن غير الصفرية، في جَعْل سحب ضخمة من هذا الجسيم يجذب بعضُها بعضًا وتساعد على البدء في تكوين المجرات.

في الحقبة المبكرة من عمر الكون، كان من شأن هذه النيوترينوات أن تتحرك بنشاط فائق، بحيث تضاهي سرعتُها سرعةَ الضوء. وفق المصطلحات المتخصصة تُوصَف هذه الكيانات الطائرة بصفة «الحارة»، وتظهر عمليات المحاكاة الحاسوبية لتطور المجرات في كون مليء بهذه «المادة السوداء الحارة» أن المجرات تتكون في عناقيد كثيفة ذات فراغات كبيرة فيما بينها، ومع ذلك لا تبدو النماذج الحاسوبية للكون مشابهةً لما يرصده الفلكيون في الواقع.

كان تطور المجرات سيسير على نحو مختلف تمامًا لو أن هذه المادة السوداء تكوَّنت من جسيمات ضخمة بطيئة الحركة، ومن ثَمَّ «باردة». مشكلة هذا الطرح هي أنه لا وجود لمثل هذه الكيانات في النموذج المعياري؛ لذا إذا كان هذا هو حل مشكلة المادة المظلمة، فمن شأنه أن يستدعي سؤالًا آخَر: ما هي هذه الجسيمات؟

يأخذنا هذا إلى الأفكار الحالية بشأن ما يكمن خلف النموذج المعياري. تطرح إحدى النظريات المفضلة فكرةَ وجود جسيمات «فائقة التناظر»، وأخف هذه الجسيمات يتضمن أشكالًا لا تستجيب للقوة الكهرومغاطيسية أو القوة الشديدة، لكن يمكن أن تكون أثقل بمئات المرات من البروتونات. قد تملك التصادمات التي تحدث في أعلى معجلات الجسيمات طاقةً — وتحديدًا المعجل تيفاترون في مختبر فيرميلاب ومصادم الهادرونات الكبير في سيرن — الطاقةَ الكافية لإنتاج هذه الجسيمات، وإذا تم العثور على مثل هذه الجسيمات، فسيكون التحدي هو دراسة خصائصها تفصيلًا، وتحديدًا معرفة ما إذا كان بإمكانها أن تكون عناقيد كبيرة الحجم من المادة المظلمة في الحقبة المبكرة من عمر الكون.

وهذا ينقلنا إلى السؤال التالي: ما هو التناظر الفائق؟

التناظر الفائق

تكفَّلَتْ ميكانيكا الكم بحل اللغز المتمثل في كيفية تكوين الذرات «الخاوية» للمادة الصلبة، ويكمن الحل في حقيقة أن الإلكترونات (والكواركات والبروتونات والنيوترونات) كلها تملك لفًّا مغزليًّا داخليًّا يساوي نصف المقدار المعروف باسم ثابت بلانك، ورمزه h. هذه الجسيمات «ذات اللف المغزلي ١ / ٢» تُعرَف إجمالًا باسم الفرميونات. تقضي ميكانيكا الكم باستحالة أن يشغل اثنان من الفرميونات الموضعَ عينه، وبنفس حالة الحركة، وباللغة المتخصصة نقول إنه «يستحيل عليهما أن يشغلا الحالة الكمية عينها»، وهذا يتسبب في جعل الإلكترونات المختلفة داخل الذرات المعقَّدة تشغل حالات محدَّدة، ويتسبَّب في حدوث التفاعلات الكيميائية، أو الخمول، للعناصر المختلفة. وهذا القانون أيضًا يمنع أي إلكترون داخل نفس الذرة من الالتصاق بسهولة بإلكترون ينتمي لذرة أخرى مجاورة، وهذا ما تقوم عليه خصائص عديدة للمادة الكثيفة، على غرار الصلابة.

القوى العاملة بين هذه الفرميونات تُنقَل بواسطة الفوتونات، والجلوونات، والبوزونات W وZ. لاحظ أننا استخدمنا كلمة «بوزونات»، وهي كلمة عامة تشير إلى الجسيمات ذات اللف المغزلي المقدَّر بأرقام صحيحة هي مضاعفات ثابت بلانك. كل حاملات القوى هذه بوزونات، ولها لف مغزلي ذو رقم صحيح. وعلى النقيض من الفرميونات — التي لا يمكن لأحدها الوجود في موضع الآخَر — تميل البوزونات إلى التجمُّع مكوِّنَةً حالات جمعية، كما الحال مع الفوتونات المؤلفة لأشعة الليزر.

رأينا أن الفرميونات — الكواركات واللبتونات — تظهر وحدة عميقة، والأمر عينه ينطبق على البوزونات الحاملة للقوى. لماذا تتألف «جسيمات المادة» (ظاهريًّا) من فرميونات ذات لف مغزلي قدره ١ / ٢، بينما تُنقَل القوى بواسطة بوزونات ذات لف مغزلي قدره واحد صحيح؟ هل يمكن أن يكون هناك تناظر إضافي بين القوى وجسيمات المادة، بحيث يكون للفرميونات المعروفة نظراء من بوزونات جديدة، ويكون للبوزونات المعروفة نظراء من فرميونات جديدة، وبحيث تُنقَل قوى جديدة بواسطة هذه الفرميونات؟ هل يمكن لهذا أن يؤدي إلى توحيدٍ أكثر اكتمالًا بين القوى والجسيمات؟ وفق النظرية المعروفة باسم التناظر الفائق، الإجابة هي نعم.

في نموذج التناظر الفائق، هناك عائلات من البوزونات ترافِق الكواركات واللبتونات المعروفة، وهي تُعرَف باسم «الكواركات الفائقة» و«اللبتونات الفائقة». لو كان التناظر الفائق دقيقًا على نحو تام، فسيكون لكل نوع من اللبتونات أو الكواركات الكتلة عينها

التي يملكها نظيره الفائق. سيكون لكلٍّ من الإلكترون والإلكترون الفائق الكتلة عينها، وبالمثل سيكون للكوارك العلوي والكوارك العلوي الفائق الوزن نفسه، وهكذا. لكن في الواقع، لا تسير الأمور على هذا النحو؛ فالإلكترون الفائق، لو كان له وجود، فستبلغ كتلته قدرًا أكبر بكثير من ١٠٠ جيجا إلكترون فولت، وهو ما يعني ضمنًا أنه سيكون أثقل بمئات آلاف المرات من الإلكترون. والأمر عينه ينطبق على الكواركات الفائقة واللبتونات الفائقة.

يمكن قول نفس الشيء على النظراء الفائقين للبوزونات المعروفة. ففي نموذج التناظر الفائق هناك عائلات من الفرميونات تناظر البوزونات المعروفة، وهنا تضاف اللاحقة «–ينو» إلى نهاية اسم البوزون المعروف للإشارة إلى نظيره الفرميوني الفائق، وبهذا يكون لدينا الفوتون الفائق (الفوتينو) والجلوون الفائق (الجلووينو) وبوزون Z الفائق (الزينو) وبوزون W الفائق (الوينو). أما جسيم الجرافيتون الافتراضي، الذي يُفترَض أن يحمل قوةَ الجاذبية، فيُتنبَّأ بأن له نظيرًا فائقًا هو الجرافيتينو. وهنا أيضًا، لو كان التناظر الفائق تامًّا، لكان كلٌّ من الفوتينو والجلووينو والجرافيتينو عديم الكتلة، على غرار الفوتون والجلوون والجرافيتون، أما الوينو والزينو فستكون كتلتاهما ٨٠ و٩٠ جيجا إلكترون فولت على غرار البوزون Z والبوزون W. لكن كما شهدنا في الحالة السابقة، فإن للنظراء الفائقين هنا أيضًا كتلًا أكبر بكثير من الجسيمات الأصلية المناظرة لها.

المزحة المعتادة، والفاترة أيضًا، هي أن التناظر الفائق لا بد من أن يكون صحيحًا؛ إذ إننا وجدنا نصف الجسيمات بالفعل. بعبارة أخرى، لم يحدث بعدُ أن عثرنا على أي دليل قاطع على وجود أي كوارك فائق أو لبتون فائق، ولا أي فوتينو أو جلووينو أو وينو أو زينو. ويحتل البحث عن هذه الجسيمات في الوقت الحالي أولويةً عظمى.

في ظل هذا النقص في الأدلة على وجود الجسيمات الفائقة، قد يتعجَّب المرء من سبب إيمان المنظرين بنموذج التناظر الفائق من الأساس. يتضح لنا أن مثل هذا التناظر أمر طبيعي للغاية، على الأقل من الناحية الحسابية، في ظل طبيعة الزمان والمكان كما تتضمنها نظرية النسبية لأينشتاين وطبيعة نظرية الكم. فالنمط الناتج من الجسيمات الفائقة يحل بعضًا من المشكلات الفنية في الصياغة الحالية لفيزياء الجسيمات، ويضفي التوازن على نظريات الكم الخاصة بسلوك القوى المختلفة على الطاقات العالية واستجابات الجسيمات لهذه القوى. باختصار، دون نموذج التناظر

بعض الجسيمات وجسيمات التناظر الفائق المناظرة لها			
كوارك	q	كوارك فائق	$\tilde{q}$
لبتونات	l	لبتون فائق	$\tilde{l}$
إلكترون	e	إلكترون فائق	$\tilde{e}$
نيوترينو	ν	نيوترينو فائق	$\tilde{\nu}$
فوتون	γ	فوتينو	$\tilde{\gamma}$
جلوون	g	جلووينو	$\tilde{g}$
بوزون	W	وينو	$\tilde{W}$
بوزون	Z	زينو	$\tilde{Z}$
بوزون هيجز	H	هيجزينو	$\tilde{H}$

شكل ١٠-١: ملخص لجسيمات نموذج التناظر الفائق: النيوترينوات الضخمة والتذبذبات.

الفائق، تؤدي محاولات بعينها لبناء نظريات موحَّدة إلى نتائج عبثية، على غرار إمكانية أن تقع أحداث معينة باحتمالات لا نهاية لها، ومع ذلك فإن التفاوتات الكمية، التي فيها يمكن للجسيمات والجسيمات المضادة أن تظهر لحظيًّا من الفراغ قبل أن تتلاشى مجدَّدًا، يمكن أن تتأثر بجسيمات نموذج التناظر الفائق إلى جانب تأثُّرها بالجسيمات المعروفة الأخرى. ومن دون الإسهامات التي يقدِّمها نموذج التناظر الفائق، تعطي بعض العمليات الحسابية نتائج عبثية، على غرار الاحتمالات اللانهائية التي ذكرناها سلفًا، لكن حين تُدرَج إسهامات هذا النموذج، تظهر نتائج أكثر معقولية. وتشجِّع حقيقةُ أن تلك النتائج المجافية للمنطق قد اختفت ما إن تم استخدام نموذج التناظر الفائق؛ آمالَ العلماء في أن التناظر الفائق موجود بالفعل في نظام الطبيعة. لا شك في أن التخلص من النتائج العبثية أمر ضروري، لكننا ما زلنا لا نعرف ما إذا كانت النتائج المعقولة تتوافق بالفعل مع الطريقة التي تسير بها الأمور داخل الطبيعة أم لا؛ ومن ثَمَّ فإن لدينا

على أفضل التقديرات لمحاتٍ عن أن نموذج التناظر الفائق يعمل بنجاح، وإن كان يعمل على نحو خفي علينا في الوقت الحالي. والتحدي هو إنتاج جسيمات تناظرية فائقة في التجارب العملية، وهذا من شأنه إثبات النظرية وتمكين الفهم المفصل لها من الظهور، من واقع دراسة خصائص هذه الجسيمات.

قد يكون التناظر الفائق مسئولًا على الأقل عن بعضٍ من المادة المظلمة التي تبدو وكأنها تهيمن على الكون المادي. فمن واقع حركة المجرات وغيرها من القياسات الكونية، يمكن الخلوص إلى أن نحو ٩٠ بالمائة من الكون يتكون من مادة «مظلمة» غامضة، ومظلمة هنا تعني أنه ليس لها أي سطوع، وهو ما قد يرجع إلى أن القوة الكهرومغناطيسية لا تؤثِّر بها. في نموذج التناظر الفائق، إذا كانت أخفُّ الجسيمات الفائقة متعادلة الشحنة الكهربية، على غرار الفوتينو والجلووينو مثلًا، فيمكنها أن تكون شبه مستقرة؛ ومن ثَمَّ يكون بمقدور هذه الجسيمات تكوين مجموعات كبيرة الحجم بفضل قوى الجذب المتبادلة بينها، وذلك على نحو أشبه بالطريقة التي تكوَّنَتْ بها النجوم في بداياتها. لكن بينما تتكون النجوم من الجسيمات العادية — ويكون بإمكانها المرور بعملية الاندماج النووي وأن تستشعر الضوء بفضل استشعارها القوى الأربع كافة — فإن البوزونات الفائقة لن يكون بوسعها ذلك. وحين تُكتشف جسيمات التناظر الفائق — إن اكتُشِفت من الأساس — فسيكون من المثير معرفة ما إذا كانت الجسيمات المتعادلة المطلوبة هي بالفعل أخف الجسيمات، وما إذا كانت تملك الخصائص المطلوبة، وإذا تبيَّنَ أن الأمر كذلك بالفعل، فسنكون بصدد أجمل تلاقٍ يمكن أن يحدث بين مجال فيزياء الجسيمات العالية الطاقة والكون إجمالًا.

النيوترينوات الضخمة

في النموذج المعياري للجسيمات، يُفترض أن تكون النيوترينوات عديمة الكتلة، وسبب هذا الافتراض هو أنه لم يتمكن أي شخص من أن يقيس قيمة محدَّدة لأي كتلة قد تحملها هذه النيوترينوات، فمقدار كتلتها ضئيل للغاية لدرجة أنه من الممكن أن تساوي صفرًا. ومع ذلك، لا يوجد مبدأ أساسي نعلمه ينصُّ على أن تكون النيوترينوات عديمة الكتلة، بل في واقع الأمر، بتنا نعرف الآن أن النيوترينوات لها كتلة، كتلة ضئيلة للغاية مقارنةً حتى بكتلة الإلكترون، لكنها رغم هذا ليست صفرية.

هناك ثلاثة أنواع معروفة من النيوترينوات: النيوترينوات الإلكترونية، والنيوترينوات الميوونية، والنيوترينوات التاوونية، وهي تحمل هذه الأسماء نظرًا لأنها تُنتَج برفقة هذه الجسيمات ذات الشحنة الكهربية التي تتقاسم معها اسمها. تطلق التفاعلات الاندماجية التي تجري داخل الشمس نيوترينوات من النوع الأول.

في ميكانيكا الكم، للجسيمات خصائص شبه موجية، ومثلما تتخذ تذبذبات المجال الكهرومغناطيسي سمات شبه جسيمية — الفوتونات — تتخذ أيضًا جسيماتٌ كالنيوترينوات تذبذباتٍ شبه موجية بينما تنتقل عبر الفضاء؛ ومن ثَمَّ فهي تكون موجة ذات احتمالية متغيرة. والنيوترينو الذي بدأ رحلته كنيوترينو إلكتروني قد تتغير احتماليته مع تحركه، بحيث يتحوَّل من نيوترينو إلكتروني إلى نيوترينو ميووني أو نيوترينو تاووني، بينما يبتعد عن المصدر الذي انطلق منه. لكن كي يحدث هذا الأمر، على النيوترينوات أن تمتلك كتلًا متباينة، وهو ما يعني ضمنًا أنه ليس من الممكن أن تكون جميعها عديمة الكتلة.

على امتداد عدة عقود قِيست شدة النيوترينوات الإلكترونية الآتية من الشمس، وفي ضوء معرفتنا بالطريقة التي تعمل بها الشمس، أمكن حساب عدد النيوترينوات الإلكترونية التي أُنتِجت، ومن ثَمَّ حساب شدتها حين وصلت إلى الأرض. لكن حين أُجرِيت الحسابات، وجدنا أن شدة النيوترينوات الإلكترونية الآتية إلى الأرض أقل بمعامل قدره اثنان أو ثلاثة عن المتوقع. كانت هذه أول بادرة على أن للنيوترينوات الإلكترونية كتلة، وأنها تتغير إلى أنواع أخرى وهي في الطريق. رُصِدت مواطن شذوذ أخرى مشابهة في خليط النيوترينوات الإلكترونية والنيوترينوات الميوونية المنتجة حين تصطدم الأشعة الكونية بطبقة الغلاف الجوي العليا، وقد أكدت سلسلة من التجارب المكرَّسة لهذا الغرض أُجرِيت في نهاية القرن العشرين أن النيوترينوات لها بالفعل كتلة، وأنها تتأرجح من شكل إلى آخَر أثناء حركتها.

لم تتمكن تجربة أُجرِيت في مرصدساندبري للنيوترينوات (أونتاريو) من أن ترصد النيوترينوات الإلكترونية الآتية من الشمس (والتي شهدت قلة في أعدادها) فحسب، بل تمكنت أن تحصي أيضًا العدد الإجمالي لكل الأنواع (وهو ما أكَّد أن العدد الإجمالي كان مماثلًا لذلك الذي جرى التنبؤ به). أوضح هذا الكشف أن النيوترينوات الإلكترونية تغيَّرَتْ بالفعل، بَيْدَ أنه لم يوضِّح النوع الذي فضَّلت النيوترينوات أن تتغيَّر إليه.

ثم بدأنا في تجارب «الخط القاعدي الطويل». ففي مختبرات على غرار سيرن، وفيرميلاب، وكيه إي كيه في اليابان، تُنتَج حزم من النيوترينوات تحت السيطرة، وتقاس

طاقة النيوترينوات وشدتها وتركيبتها (النيوترينوات الميوونية بالأساس) عند المصدر، ثم تُوجَّه عبر الأرض كي يتم رصدها على بُعْدِ عدة مئات من الكيلومترات في مختبر بعيد تحت الأرض. وعن طريق مقارنة تركيبة الحزمة عند وصولها بتركيبتها لدى انطلاقها، يصير من الممكن تحديد أي النكهات تحولت إلى نكهات أخرى، ومدى السرعة التي يجري بها هذا الأمر، وانطلاقًا من ذلك يكون من الممكن أن نحسب الكتل النسبية لكل نوع (من الناحية الفنية، الفارق المربع بين كُتَلها هو ما يتم تحديده بهذه الطريقة).

خلال العقد الأول من القرن الحادي والعشرين من المنتظر أن نحصل على ثروة من المعلومات بشأن النيوترينوات الغامضة، وذلك بفضل هذه التجارب. إن تحديد نمطِ كُتَل النيوترينوات سيمدنا ببعض المؤشرات المفقودة بالنموذج المعياري، فنحن لا نعلم السبب الذي يجعل الكواركات واللبتونات المشحونة تمتلك كتلًا بهذه المقادير تحديدًا، وإن امتلاك هذه الجسيمات لتلك القيم لَأمرٌ محوري للغاية بالنسبة لوجودنا؛ ولذا فإن فهم هذا الأمر من شأنه أن يمثِّل طفرة علمية كبيرة. ويمكن لتحديد كتل النيوترينوات أن يمدنا بأدلة حاسمة تساعدنا في كشف النقاب عن هذه الأحجية.

يمكن أيضًا أن يكون لكتل النيوترينوات تأثير على علم الكونيات. فالنيوترينوات الضخمة من الممكن أن تكون قد لعبت دورًا في تكوين البذور الأولى للمجرات، ويمكنها أن تلعب دورًا ما في تفسير طبيعة المادة المظلمة المنتشرة في كل مكان بالكون، كما يظل السبب وراء انتهاك التفاعل الضعيف لمبدأ التكافؤ، أو التناظر الانعكاسي، مستعصيًا عن الحل. توفِّر النيوترينوات مدخلًا خاصًّا لاستكشاف التفاعل الضعيف، ومن ثَمَّ قد تؤدي الدراسة المتزايدة لخصائصها إلى اكتشافات غير متوقَّعة.

إن تحديد قِيَم كُتَل النيوترينوات لَهو أحد التحديات الكبرى التي يواجهها فيزيائيو الجسيمات في وقتنا الحالي، وهذا يؤدي بنا على نحو طبيعي إلى سؤال أكبر: ما هي طبيعة الكتلة نفسها؟

الكتلة

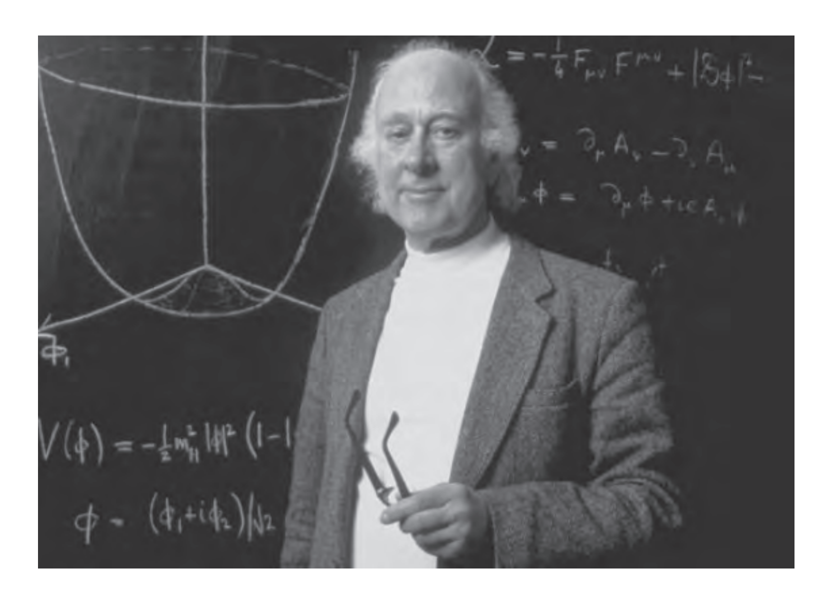
القوة الكهروضعيفة هي تلك القوة التي تنقلها الفوتونات المألوفة بالنسبة لنا، وتنقلها أيضًا بوزونات W وZ، المسئولة عن التفاعلات الضعيفة التي لا تمثِّل نقطةَ بدءِ الاحتراقِ الشمسي فحسب، بل هي أيضًا أساس أنواع معينة من النشاط الإشعاعي. لكن ما دامت هذه التأثيرات متشابكة عن كثب على هذا النحو، فلِمَ تبدو على هذا القدر من الاختلاف

في خبراتنا اليومية؛ أي عند درجات الحرارة والطاقات المنخفضة نسبيًّا؟ أحد أسباب ذلك هو أن الجسيمَ الذي ينقل القوة الكهرومغناطيسية — الفوتون — عديمُ الكتلة، بينما بوزونات W وZ، المرتبطة بالقوة الضعيفة، لها كتل ضخمة، و«يزن» كلٌّ منها مقدارًا مساويًا لوزن ذرة الفضة.

يفسِّر النموذجُ المعياري للجسيمات الأساسية والقوى العاملة بينها الكتلةَ، من خلال افتراض أن المتسبب فيها هو مجال جديد، يُدعَى مجال هيجز، وذلك على اسم بيتر هيجز الذي كان أول مَن أدرك هذه الإمكانية النظرية، وذلك عام ١٩٦٤. ينتشر مجال هيجز في الفضاء كله، ووفق هذه النظرية، لو لم يكن هناك وجود لمجال هيجز لما امتلكت الجسيمات الأساسية أي كتلة. إن ما ندركه نحن بوصفه الكتلة، ما هو — جزئيًّا — إلا تأثير للتفاعل بين الجسيمات ومجال هيجز. الفوتونات لا تتفاعل مع مجال هيجز، ومن ثَمَّ هي عديمة الكتلة، أما بوزونات W وZ فتتفاعل معه، ومن ثَمَّ تكتسب كتلها الضخمة. أيضًا من المفترض أن الوحدات البنائية للمادة — الكواركات واللبتونات — تكتسب كتلتها من خلال التفاعل مع مجال هيجز.

مثلما تنتج المجالات الكهرومغناطيسية الحِزَمَ الكمية التي نسميها الفوتونات، من المفترض أن يتجسد مجال هيجز في بوزونات هيجز. في نظرية هيجز الأصلية كان هناك نوع واحد فحسب من بوزون هيجز، لكن لو صَحَّتْ نظرية التناظر الفائق فمن المفترض أن تكون هناك عائلة من هذا النوع من الجسيمات.

بالجمع بين قياسات الدقة المأخوذة من مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير وغيره من المعجلات، وبين الحسابات الرياضية الخاصة بنظرية الكم والنموذج المعياري، تمكَّنَ الفيزيائيون النظريون من تحديد الطاقات التي من المفترض أن يكشف فيها عن بوزون هيجز، أو غيره من الجسيمات المتسبِّبة في نشوء الكتلة. تقضي هذه الحسابات بأن أصول الكتلة تجمَّدت في نسيج الكون بعد الانفجار العظيم بجزء من مليون مليون جزء من الثانية، حين «بردت» الحرارة إلى ما دون عشرة آلاف مليون مليون درجة. وقد صُمِّم مصادم الهادرونات الكبير في سيرن لمحاكاة هذه الظروف. وفي يوليو ٢٠١٢ أُعلن عن اكتشاف جسيم تبلغ كتلته نحو ١٢٥ جيجا إلكترون فولت، تتفق احتمالية إنتاجه ونمط تحلله مع الخواص المتوقعة من بوزون هيجز. وحتى نوفمبر ٢٠١٢ يبدو من المؤكد أن كتلة البوزونين W وZ تأتي من آلية هيجز، وأن كتل الكواركات القمية والقاعية تنشأ منها بالمثل. من المبكر أيضًا تحديد ما إذا كانت كتلة الكواركات الأخف،



شكل ١٠-٢: بيتر هيجز، وعلى السبورة خلفه شرح لجزء من نظريته.[1]

وكتلة اللبتونات، تنشأ هي الأخرى من هذه الآلية. وستأتينا الإجابة مع تراكم البيانات على مر السنوات القادمة.

بلازما الكواركات والجلوونات

لو صَحَّتِ الصورة التي نملكها عن منشأ المادة، فلا بد أن الكواركات والجلوونات — الحبيسة في كوننا البارد داخل البروتونات والنيوترونات — كانت وقت حدوث الانفجار العظيم على درجة من الحرارة تمنعها من التماسك بعضها ببعض. بدلًا من ذلك، كانت هذه الجسيمات موجودة داخل «حساء» غليظ نشيط يُعرَف باسم «بلازما الكواركات والجلوونات».

هذه الحشود المتداخلة من الكواركات والجلوونات تشبه حالة المادة المعروفة بالبلازما، على غرار تلك الموجودة في قلب الشمس، والتي تتألف من غازات مستقلة من

الإلكترونات والأنوية التي يمنعها نشاطها البالغ من الاتحاد معًا لتكوين ذرات متعادلة الشحنة.

يسعى العلماء لإنتاج بلازما الكواركات والجلوونات من خلال ضرب أنوية الذرات الضخمة بعضها ببعض على طاقات عالية للغاية، لدرجة أن البروتونات والنيوترونات تنضغط معًا. إنهم يأملون أن الأنوية سوف «تذوب»؛ أي إن الكواركات والجلوونات سوف تتدفق خارجةً من النواة بدلًا من أن تظل «متجمدة» على صورة نيوترونات وبروتونات منفردة.

في مختبر سيرن، أُطلقت حِزَمٌ من الأنوية الثقيلة على أهداف ساكنة من عناصر ثقيلة. وقد بنى «مصادم الأيونات الثقيلة النسبوية» في مختبر بروكهافن الوطني بالولايات المتحدة آلةً مخصَّصة لهذا الغرض تتصادم فيها الأنوية الثقيلة بعضها ببعض على نحو مباشِر. ومثلما الحال في تصادمات الجسيمات الأبسط، على غرار الإلكترونات والبروتونات، فإن المزية العظيمة لآلة تصادم الحزم هي أن كل الطاقة المكتسبة من عملية تعجيل هذه الجسيمات تدخل في التصادم. وسيفوق مصادمُ الهادرونات الكبير الموجود في سيرن مصادمَ الأيونات الثقيلة من حيث الطاقة، وسوف يعمل على مصادمة أيونات الرصاص بطاقة إجمالية قدرها ١٣٠٠ تيرا إلكترون فولت. عند هذه المستويات المتطرفة من الطاقة — المشابهة لتلك التي كانت معتادة في الكون حين كان عمره أقل من جزء من تريليون جزء من الثانية — من المفترض أن تصير بلازما الكواركات والجلوونات شائعةً، ومن ثَمَّ سيتمكن القائمون على التجربة من دراسة خصائصها تفصيلًا.

المادة المضادة والشحنة السوية

يبدو أننا نعيش داخل حيز من المادة يبلغ قطره ما لا يقل عن ١٢٠ مليون سنة ضوئية، واستنادًا إلى الاختلافات الطفيفة في سلوك المادة والمادة المضادة على مستوى الجسيمات الأساسية (ما يُعرَف من الناحية الفنية باسم «تناظر الشحنة السوية»)، يحبِّذ الفيزيائيون الفكرة التي تذهب إلى أن ثمة تناظرًا دقيقًا بين المادة والمادة المضادة إجمالًا، وأنه بعد الانفجار العظيم مباشَرةً اختلَّ هذا التوازن بحيث صارت المادة هي المهيمنة على الكون. والتحدي الماثل أمامنا الآن هو دراسة هذه الاختلافات تفصيلًا كي نحدِّد أصلها، وربما نتمكن وقتها من تحديد مصدر التناظر بين المادة والمادة المضادة في الكون.

يتألف الكاوون من كوارك وكوارك مضاد، ومن ثَمَّ تمتلك الكاوونات خليطًا متساويًا من المادة والمادة المضادة. يتألف الكاوون المتعادل الشحنة (K^0) من كوارك سفلي وكوارك غريب مضاد، فيما يتألف الجسيم المضاد له من كوارك سفلي مضاد وكوارك غريب؛ وبهذا يكون الكاوونان K^0 و$\overline{K}^0$ جسيمين مختلفين، لكنهما مرتبطان على نحو وثيق بفضل القوة الضعيفة التي تسمح — على نحو مثير للدهشة — للكاوون K^0 بالتحول إلى $\overline{K}^0$ والعكس بالعكس، وذلك عن طريق التفاعلات بين الكواركات والكواركات المضادة المؤلِّفة لهما. ما يعنيه هذا التأثير هو أنه بمجرد إنتاج كاوون متعادل الشحنة أو كاوون مضاد متعادل الشحنة، فإن بعض «الخلط» الكمي الميكانيكي يبدأ في الحدوث.

تُعرَف الجسيمات الناتجة عن عملية الخلط الداخلية هذه باسم الكاوونات K_S (أو الكاوونات القصيرة) وK_L (الطويلة). تعيش الكاوونات الطويلة نحو ٦٠٠ مرة قدر المدة التي تعيشها الكاوونات القصيرة، والسمة المهمة هنا هي أن الحالتين، الطويلة والقصيرة، تنتهجان سلوكًا مختلفًا في «الصور المنعكسة» المجتمعة للشحنة السوية؛ إذ تتحلل الحالتان بطُرُق متباينة، بحيث يتحلَّل الكاوون القصير إلى اثنين من البايونات، فيما يتحلل الكاوون الطويل إلى ثلاثة بايونات. لو كان تناظُر الشحنة السوية تامًّا، فإن هذا النمط كان سيظل صحيحًا على الدوام، وما كان للكاوون الطويل مثلًا أن يتحلل إلى اثنين من البايونات مطلقًا. ومع ذلك، ففي نحو ٠٫٣٪ من الحالات يتحلل الكاوون الطويل بالفعل إلى اثنين من البايونات، وكان كرونين وفيتش وزملاؤهما هم أول مَن رصد هذا الأمر.

والسؤال الذي يشغل عقول فيزيائيين كُثُر الآن هو ما إذا كانت «مصادفة» الأجيال الثلاثة هي ما أدَّتْ إلى هيمنة المادة على كوننا. تذهب النظرية إلى أن تأثير خرق الشحنة السوية من المفترض أن يكون عظيمًا في حالة الميزونات القاعية، التي تشبه الكاوونات، لكن مع إحلال الكوارك القاعي محل الكوارك الغريب. تخضع منظومة الميزونات القاعية الآن إلى بحث تجريبي مكثَّف، وتم الكشف عن أولى العلامات على وجود تناظر كبير. سينتج مصادم الهادرونات الكبير أعدادًا كبيرة من الجسيمات القاعية، وسيكون بحث تناظر الشحنة السوية لهذه الجسيمات جزءًا مهمًّا من برنامج العمل هناك، وهناك تجربة مكرَّسة لتحقيق هذا الغرض باسم تجربة مصادم الهادرونات الكبير القاعية.

تساؤلات مستقبلية

والآن نأتي للجزء الغريب بحق: وفق أحدث النظريات، ما الأبعاد المكانية الثلاثة والبعد الزمني إلا جزء من كون أعمق من ذلك، فهناك أبعاد تقع خارج نطاق إدراك حواسنا المعتادة، لكن من الممكن الكشف عنها في التجارب المستقبلية العالية الطاقة التي ستُجرَى في مختبر سيرن.

لاستيعاب هذه الصورة تخيَّلْ كونَنا وقد أدركته مخلوقات مسطحة لا تعي سوى بُعْدين فحسب، أما نحن — بفضل وعينا الأفضل منهم — فنعي وجود البُعْد الثالث، وبهذا يمكننا أن نتخيل لوحين مستويين يفصل بينهما مليمتر واحد على سبيل المثال. من الممكن أن تتسرب تأثيرات القوى الواقعة على أحد اللوحين إلى الفجوة، بَيْدَ أن الكائنات المسطحة لن يسعها إدراك ذلك، سيكون بوسعها إدراك التأثيرات اللاحقة، التي ستكون واهنةً مقارَنةً بالتأثيرات المنحصرة داخل كون اللوح المسطح الذي تعيش فيه وتستشعره.

الآن تخيَّلْ أننا نحن تلك الكائنات المسطحة، وأننا نقطن كونًا ذا أبعاد أعلى. الفكرة هنا هي أن قوة الجاذبية تبدو لنا ضعيفة لأنها تأثير لقوى أخرى تتسرب بعيدًا نحو الأبعاد الأعلى لكوننا؛ ولهذا حين نستشعر قوة الجاذبية، إنما نحن نستشعر تأثير القوى الموحدة الأخرى التي تسرَّبت بعيدًا إلى الأبعاد الأعلى، تاركةً أثرًا بسيطًا ليؤدي عمله. بل يمكننا أيضًا تخيُّلُ أحد الجسيمات وهو ينتقل من أبعادنا «المسطحة» إلى أبعاد أخرى أعلى، ومن ثَمَّ فإنه «يختفي» فعليًّا من كوننا كما نعرفه.

وهكذا في التجارب الجديدة التي ستُجرَى في مصادم الهادرونات الكبير في سيرن، سيترقَّب الفيزيائيون العلامات الدالة على ظهور الجسيمات أو اختفائها «تلقائيًّا». وإذا حدث أن رُصدَت مثل هذه الظاهرة على نحو منتظم، فسيمكنها أن تقدِّم لنا الدليل على أننا بحقٍّ كائنات مسطحة، وأن هناك أبعادًا أخرى في الطبيعة غير الأبعاد المكانية الثلاثة والبُعْد الزمني، لكننا لا نعيها في الوقت الحالي.

لقد وصلنا إلى نقطة بات من الصعب فيها التفرقة بين العلم الحقيقي والخيال العلمي، لكن منذ قرن مضى، لم يكن أغلب ما نأخذه كأمور مسلَّم بها اليومَ ليخطر في خيال كاتب الخيال العلمي إتش جي ويلز، وبعد مئات الأعوام من الآن ستحوي المراجع العلمية من المواد ما لم نحلم به بعدُ. منذ نحو خمسين عامًا قرأت كتابًا كان يستعرض عجائب الذرات المكتشَفَة حديثًا وقتها، وكان يناقش أيضًا الجسيمات الغريبة التي كانت

تظهر في الأشعة الكونية، وها أنا اليوم أكتب لك عن هذه الأشياء، وربما بعد نصف قرن آخَر تقوم أنت بتحديث هذه القصة بنفسك. أتمنى لك حظًّا سعيدًا.

هوامش

(1) © David Parker/Science Photo Library.

مسرد المصطلحات

أجيال: الكواركات واللبتونات توجد في ثلاثة «أجيال»؛ الجيل الأول يضم الكواركات العلوية والسفلية، والإلكترون والنيوترينو. الجيل الثاني يضم الكواركات الساحرة والغريبة، والميوون، وأيضًا نوع آخر من النيوترينو، بينما الجيل الثالث والأضخم يضم الكواركات القمية والقاعية، والتاوون، وأيضًا نوع ثالث من النيوترينو. ونحن نعتقد أنه لا توجد أمثلة أخرى على مثل هذه الأجيال.

إس إل إيه سي: مركز معجل ستانفورد الخطي، كاليفورنيا، الولايات المتحدة.

إس إن أو: مرصد النيوترينوات بسادبيري، مختبر تحت الأرض في سادبيري، أونتاريو.

الأشعة الكونية: جسيمات عالية الطاقة وأنوية ذرية آتية من الفضاء الخارجي.

إل إتش سي: مصادم الهادرونات الكبير، وهو معجل في سيرن.

إل آي إن إيه سي: اختصار للمعجل الخطي.

إل إي بي: مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير في سيرن.

إلكترون فولت: وحدة طاقة، وهو كمية الطاقة التي يحصل عليها الإلكترون عند تعجيله بمقدار فولت واحد.

الإلكترون: مكون أساسي للذرة، خفيف الوزن، ذو شحنة كهربية.

إم إيه سي إتش أو: اختصار لأجرام الهالة الهائلة المضغوطة.

أيون: ذرة تحمل شحنة كهربية نتيجة تجريدها من واحد أو أكثر من الإلكترونات (أيون موجب)، أو تحمل فائضًا من الإلكترونات (أيون سالب).

الباريونات: طبقة من الهادرونات، تتألف من ثلاثة كواركات.

البايون: أخف مثال على الميزونات، يتألف من النكهة العلوية و/أو السفلية للكوارك والكوارك المضاد.

البروتون: المكون الموجب الشحنة الكهربية لنواة الذرة.

بوزون هيجز: جسيم ضخم يُتنبَّأ بأنه مصدر كتلة الجسيمات على غرار الإلكترونات والكواركات والبوزون W وZ.

بوزون W: جسيم ضخم مشحون كهربيًّا، يحمل أحد أشكال القوة الضعيفة، وهو شقيق بوزون Z.

بوزون Z: جسيم ضخم متعادل كهربيًّا، يحمل أحد أشكال القوة الضعيفة، وهو شقيق بوزون W.

بوزون: اسم عام للجسيمات ذات رقم اللف المغزلي الصحيح، ويقاس بوحدات ثابت بلانك، ومن أمثلته البوزونات حاملات القوى على غرار الفوتون والجلوون وبوزونات W وZ وبوزون هيجز عديم اللف المغزلي (المتنبَّأ به وقتَ كتابة هذه الكلمات).

البوزيترون: الجسيم المضاد للإلكترون.

بيكو ثانية: واحد على مليون مليون من الثانية.

التاوون: نسخة أثقل للميوون والإلكترون.

تحلُّل بيتا (نشاط بيتا الإشعاعي): تحوُّل نووي أو خاص بالجسيمات تتسبَّب في حدوثه القوة الضعيفة، ويؤدي إلى انبعاث نيوترينو وإلكترون، أو نيوترينو وبوزيترون.

تناظر السوية: عملية دراسة منظومة أو سلسلة من الأحداث كما تبدو منعكسة في مرآة.

التناظر الفائق: نظرية توحد الفرميونات والبوزونات، ووفقًا لهذه النظرية كل جسيم معروف له نظير لم يُكتشَف بعدُ يختلف اللف المغزلي الخاص به عن الجسيم الأصلي بمقدار النصف.

التناظر: إذا لم تتغير نظرية أو إجراء ما عند إجراء عمليات معينة عليها، فعندئذٍ نقول عنها إنها متناظرة حيال هذه العمليات. على سبيل المثال، تظل الدائرة كما هي دون تغيير بعد الدوران أو الانعكاس؛ ولهذا فهي تتسم بالتناظر الدوراني أو الانعكاسي.

ثابت بلانك (h): كمية صغيرة للغاية تحكم عمل الكون على مسافات تساوي حجم الذرة أو أصغر منها. وحقيقة أنه لا يبلغ الصفر هي السبب الأساسي وراء أن حجم الذرة ليس صفرًا، والسبب وراء عجزنا عن أن نعرف في الوقت عينه موضع جسيم الذرة وسرعته بدقة تامة، والسبب وراء الغرابة الكبيرة التي يتسم بها عالم ميكانيكا الكم مقارَنَةً بخبراتنا اليومية المعتادة. أيضًا يتناسب معدل اللف المغزلي للجسيم تناسبًا طرديًّا مع ثابت بلانك (من الناحية الفنية، يتناسب مع وحدات أو أنصاف وحدات ثابت بلانك المقسوم على 2π).

الجزيء: تجمُّع من الذرات.

جسيم ألفا: بروتونان ونيوترونان مرتبطان بإحكام معًا. ينبعث في بعض عمليات التحول النووية، وهو نواة ذرة الهليوم.

الجسيم المضاد: النسخة المضادة للجسيم، على سبيل المثال الكوارك المضاد والبروتون المضاد.

الجسيمات الغريبة: جسيمات تحتوي على واحد أو أكثر من الكواركات الغريبة أو الكواركات الغريبة المضادة.

الجلوون: جسيمات عديمة الكتلة تمسك الكواركات بإحكام مكوِّنةً الهادرونات. حامل لقوى الديناميكا اللونية الكمية.

جيجا إلكترون فولت: وحدة طاقة تساوي ألف مليون (١٠٩) إلكترون فولت.

الحفاظ: إذا ظلت قيمة خاصية معينةٍ ثابتةً دون تغيُّر خلال التفاعل، يقال إن كميتها قد حُفِظَتْ.

دبليو آي إم بي: اختصار للجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل.

الديناميكا اللونية الكمية: نظرية للقوة الشديدة التي تعمل على الكواركات.

الذرة: منظومة من الإلكترونات التي تدور حول نواة، وهي أصغر جزء من العنصر لا يزال قادرًا على تحديد هوية ذلك العنصر.

الزخم الزاوي: خاصية للحركة الدوارة أشبه بالمفهوم المألوف للزخم في الحركة الخطية.

سوبركاميوكاندي: كاشف تحت الأرض للنيوترينوات وغيرها من الجسيمات الآتية من الأشعة الكونية، وهو موجود في اليابان.

سيرن: المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية، ويُسمَّى أيضًا المركز الأوروبي لفيزياء الجسيمات، ويقع في جنيف بسويسرا.

شعاع جاما: فوتون، وهو إشعاع كهرومغناطيسي عالي الطاقة للغاية.

الطاقة = الكتلة × مربع سرعة الضوء (وحدات الطاقة والكتلة): من الناحية الفنية، الوحدات ميجا إلكترون فولت أو جيجا إلكترون فولت هي مقاييس لطاقة الوضع — الطاقة = الكتلة × مربع سرعة الضوء — الخاصة بأي جسيم، لكن من المعتاد الإشارة إلى هذا فقط بمسمى الكتلة، وأن يتم التعبير عن الكتلة بوحدات ميجا إلكترون فولت أو جيجا إلكترون فولت.

طاقة الحركة: طاقة الجسم أثناء حركته.

العزم المغناطيسي: كمية تصف تفاعل أحد الجسيمات في وجود مجال مغناطيسي.

الغرابة: خاصية تملكها كل الجسيمات التي تحتوي على كوارك غريب أو كوارك غريب مضاد.

غرفة الشرارات: جهاز يُستخدَم من أجل الكشف عن مرور الجسيمات المشحونة كهربيًّا.

غرفة الفقاعات: نوع من كواشف الجسيمات — توقَّفَ استخدامها في الوقت الحالي — تكشف عن مسارات الجسيمات المشحونة كهربيًّا بواسطة آثار من الفقاعات.

فرميون: اسم عام لجسيم ذي لف مغزلي قدره نصف رقم صحيح، ويقاس بوحدات ثابت بلانك. من أمثلة الفرميونات الكواركات واللبتونات.

الفوتون: جسيم عديم الكتلة يحمل القوة الكهرومغناطيسية.

القاع أو القاعية: خاصية للهادرونات تضم كلًّا من الكواركات القاعية أو الكواركات القاعية المضادة.

القوة الشديدة: قوة أساسية، مسئولة عن ربط الكواركات والكواركات المضادة لتكوين الهادرونات، وعن الربط بإحكام بين البروتونات والنيوترونات داخل نواة الذرة، تصفها نظرية الديناميكا اللونية الكمية.

القوة الضعيفة: قوة أساسية، مسئولة عن تحلل بيتا، وينقلها كلٌّ من بوزون W وبوزون Z.

القوة الكهروضعيفة: نظرية توحِّد القوة الكهرومغناطيسية والقوة الضعيفة.

القوة الكهرومغناطيسية: قوة أساسية تعمل من خلال قوى تتراوح بين الشحنات الكهربية والقوة المغناطيسية.

الكاوون: نوع من الميزونات الغريبة.

الكتلة: القصور الذاتي لجسيم أو جسم، ومقياس لمقاومة العجلة. لاحِظْ أن «وزنك» هو القوة التي تبذلها الجاذبية على كتلتك، ومن ثَمَّ فأنت تملك الكتلة عينها سواء كنتَ على الأرض أو القمر أو في الفضاء، حتى لو كنت «عديم الوزن» هناك.

الكهروديناميكا الكمية: نظرية للقوة الكهرومغناطيسية.

الكوارك الساحر: كوارك ذو شحنة كهربية قدرها +٢ / ٣. النسخة الثقيلة من الكوارك العلوي، لكنه أخف من الكوارك القمي.

الكوارك السفلي: أخف الكواركات ذات الشحنة الكهربية −١ / ٣، وهو من الجسيمات المكوِّنة للبروتونات والنيوترونات.

الكوارك العلوي: كوارك ذو شحنة كهربية قدرها +٢ / ٣، مكون للبروتون والنيوترون.

الكوارك الغريب: كوارك ذو شحنة كهربية قدرها −١ / ٣، وهو أثقل من الكوارك السفلي، لكنه أخف من الكوارك القاعي.

الكوارك القاعي: أضخم أنواع الكواركات ذات الشحنة الكهربية −١ / ٣.

الكوارك القمي: أثقل الكواركات، له شحنة كهربية قدرها +٢ / ٣.

الكواركات: الجسيمات الأساسية المكونة للبروتونات والنيوترونات والهادرونات.

كيلو إلكترون فولت: ألف إلكترون فولت.

اللبتون: جسيم على غرار الإلكترون والنيوترينو لا يستشعر القوة الشديدة، وله لف مغزلي قدره ١ / ٢.

اللف المغزلي: مقياس للحركة الدورانية — أو الزخم الزاوي الذاتي — للجسيم، ويقاس بوحدات ثابت بلانك.

اللون: اسم غريب مُنِح لإحدى خواص الكواركات، وهذه الخاصية هي مصدر القوة الشديدة في نظرية الديناميكا اللونية الكمية.

المادة المضادة: لكل نوع من الجسيمات يوجد جسيم مضاد له خواص معاكسة على غرار الشحنة الكهربية. حين يلتقي الجسيم والجسيم المضاد يفني كل منهما الآخر وينتجان طاقة.

مايكروثانية: واحد على المليون من الثانية.

مصادم: معجل جسيمات تتقابل فيه على نحو مباشر حِزَمٌ من الجسيمات تتحرك في اتجاهات متقابلة.

مصنع الميزونات القاعية: معجل جسيمات مصمَّم بغرض إنتاج عدد ضخم من الجسيمات التي تحتوي على كواركات قاعية أو كواركات قاعية مضادة.

المُعَجِّل الدوراني (السيكلوترون): الشكل المبكر من معجلات الجسيمات.

المعجل الدوراني التزامني (السينكروترون): معجل دوراني حديث.

ميجا إلكترون فولت: مليون إلكترون فولت.

ميزون بي: رمز الميزون القاعي.

الميزون: طبقة من الهادرونات، تتكون من كوارك وحيد وكوارك مضاد.

الميوون: نسخة أثقل للإلكترون.

نانو ثانية: واحد على المليار من الثانية.

النشاط الإشعاعي: انظر تحلُّل بيتا.

النظريات الموحدة: محاولات لتوحيد نظريات القوة الشديدة، والقوة الكهرومغناطيسية، والقوة الضعيفة، وفي النهاية قوة الجاذبية.

النكهة: اسم عام للصفات التي تميِّز الكواركات المختلفة (العلوية والسفلية والساحرة والغريبة والقاعية والقمية)، واللبتونات (الإلكترون والميوون والتاوون والنيوترينو)، ومن ثَمَّ فإن النكهات تضم الشحنات الكهربية والكتلة.

النيوترون: الشريك المتعادل الشحنة الكهربية للبروتون داخل نواة الذرة، وهو يساعد على استقرار النواة.

النيوترينو: جسيم متعادل الشحنة الكهربية، وأحد أعضاء عائلة اللبتونات، يستشعر فقط القوة الضعيفة وقوة الجاذبية.

الهادرون: جسيم مؤلَّف من كواركات و/أو كواركات مضادة، وهو يستشعر التفاعل القوي.

واحد على ميجا إلكترون فولت: واحد على المليون من الإلكترون فولت.

قراءات إضافية

الاقتراحات التالية للقراءات الإضافية ليس مقصودًا منها أن تشكِّل مرشدًا شاملًا للمؤلَّفات المكتوبة عن موضوع فيزياء الجسيمات.

يتضمن هذا القسم بعض الأعمال «الكلاسيكية» التي لم تَعُدْ تُطبَع، لكن ينبغي أن تكون متاحةً في المكتبات الجيدة أو محال بيع الكتب القديمة، سواء الموجودة في الشوارع أو تلك على الإنترنت (على غرار موقع www.abebooks.com).

Frank Close, *The Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe* (Heinemann Educational, 1983). An account of particle physics in the 20th century for the general reader.

Frank Close, *Lucifer's Legacy* (Oxford University Press, 2000). An interesting introduction to the meaning of asymmetry in antimatter and other current and future areas of particle physics.

Frank Close, Michael Marten, and Christine Sutton, *The Particle Odyssey* (Oxford University Press, 2003). A highly illustrated popular journey through nuclear and particle physics of the 20th century, with pictures of particle trails, experiments, and the scientists.

Gordon Fraser (ed.), *The Particle Century* (Institute of Physics, 1998). The progress of particle physics through the 20th century.

Brian Greene, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory* (Jonathan Cape, 1999). A prize-winning introduction to the 'superstrings' of modern theoretical particle physics.

Tony Hey and Patrick Walters, *The Quantum Universe* (Cambridge University Press, 1987). An introduction to particle physics and quantum theory.

George Johnson, *Strange Beauty: Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-century Physics* (Jonathan Cape, 2000). A biography of Murray Gell-Mann, the 'father' of quarks.

Gordon Kane, *The Particle Garden: Our Universe as Understood by Particle Physicists* (Perseus Books, 1996). An introduction to particle physics and a look at where it is heading.

Robert Weber, *Pioneers of Science* (Institute of Physics, 1980). Brief biographies of physics Nobel Prize winners from 1901 to 1979.

Steven Weinberg, *The First Three Minutes* (Andre Deutsch, 1977; Basic Books, 1993). The first three minutes after the Big Bang, described in non-technical detail by a leading theorist.

Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (Pantheon Books, 1992; Vintage, 1993). A 'classic' on modern ideas in theoretical particle physics.

W. S. C. Williams, *Nuclear and Particle Physics,* revised edn. (Oxford University Press, 1994). A detailed first technical introduction suitable for undergraduates studying physics